

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

MĚŘENÍ PRŮTOKU

FLOW RATE MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dávid Chudý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Daniel Himr, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Dávid Chudý
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Daniel Himr, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření průtoku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářské téma má teoretickou a experimentální část. V teoretické části se student seznámí s problematikou měření průtoku, konkrétními metodami a možnostmi jejich aplikace. V experimentální části provede měření průtoku vybranými metodami.

Cíle bakalářské práce:

Vypracovat rešerši metod měření průtoku.
Posouzení nejistoty měření jednotlivých metod.
Experimentální porovnání vybraných metod.

Seznam doporučené literatury:

CHUDÝ, V. a kol.: Meranie technických veličín, Bratislava, Slovenská technická univerzita v Bratislavě, STU, 1999, ISBN 80-227-1275-2.

URBÁNEK, Z.: Přesnost nepřímých měření, Brno, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009, vedoucí práce: F. Vdoleček.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalárska práca systematicky predstavuje najpoužívanejšie prietokomery s dôrazom na zdroje neistoty merania. V praktickej časti bol upevňovací ultrazvukový prietokomer od spoločnosti FUJI ELECTRIC použitý pri laboratórnom meraní prietoku. Cieľom experimentu bolo stanoviť vplyv chyby vstupných hodnôt na výsledný prietok. Taktiež bola stanovená kombinovaná neistota merania pre jeden prietok so zahrnutím najvýznamnejších zdrojov nepresnosti. Sú nimi neistota merania priemeru potrubia a chyba meradla stanovená výrobcom. Spracovaním dát merania sa došlo k záverom aké uvádza výrobca v príručke.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

ultrazvuk, prietokomer, meranie, presnosť, chyba, neistota,

ABSTRACT

The bachelor thesis systematically introduces the most frequently used flowmeters with emphasis on the source of measurement uncertainty. In the practical part, the clamp on ultrasonic flowmeter from FUJI ELECTRIC was used in laboratory flow measurement. The aim of the experiment was to determine the effect of the input value error on the resulting flow. The combined standard uncertainty for one flow was also determined, including the most significant sources of inaccuracy. These are the uncertainty of the pipe diameter measurement and the meter error specified by the manufacturer. The data measurement processing led to the conclusions as stated in the manual by the manufacturer.

KEYWORDS

ultrasonic, flowmeter, measurement, accuracy, error, uncertainty,

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

CHUDÝ, Dávid. Měření průtoku. Brno, 2021.

Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132278>.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Daniel Himr

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Daniela Himra, Ph.D. a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Bratislave dňa 21. mája 2021

.....

Dávid Chudý

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce Ing. Danielovi Himrovi, Ph.D. za ochotu a cenné rady pri realizácii práci. Moja vďačnosť patrí všetkým učiteľom, ktorí vo mne vzbudzovali záujem o štúdium. V neposlednej rade veľká vďaka patrí mojej rodine, osobitne rodičom za ich lásku a podporu.

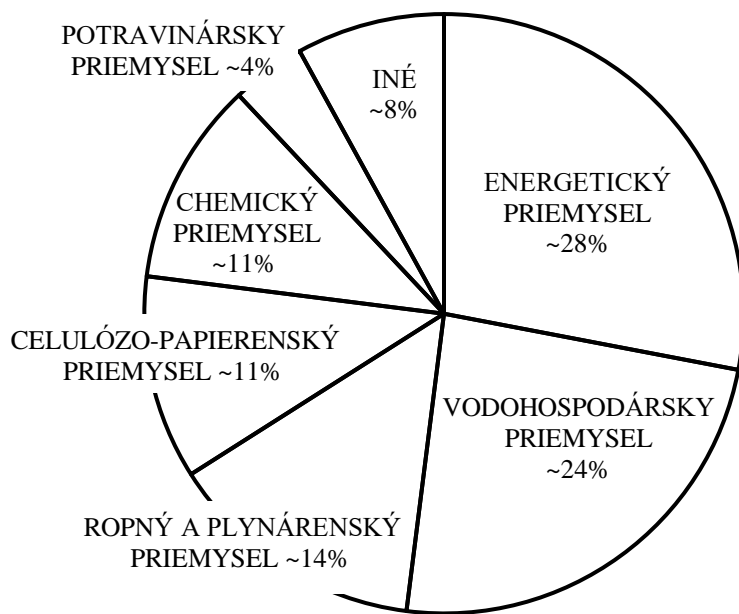
OBSAH

1 ÚVOD.....	10
2 STATUS QUO.....	11
2.1 TRADIČNÉ PRIETOKOMERY.....	11
2.1.1 OBJEMOVÉ PRIETOKOMERY.....	12
2.1.2 TURBÍNOVÉ PRIETOKOMERY.....	13
2.1.3 ROTAMETER.....	14
2.1.4 PRIEREZOVÉ PRIETOKOMERY.....	17
2.2 MODERNÉ PRIETOKOMERY.....	18
2.2.1 VÍROVÉ PRIETOKOMERY.....	19
2.2.2 ELEKTROMAGNETICKÉ PRIETOKOMERY.....	21
2.2.3 ULTRAZVUKOVÉ PRIETOKOMERY.....	22
2.2.4 CORIOLISOVÉ PRIETOKOMERY.....	27
2.2.5 TERMÁLNE PRIETOKOMERY.....	28
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE.....	29
3.1 ANALÝZA PROBLÉMU.....	29
3.2 ANALÝZA A ZHODNOTENIE REŠERŠE.....	29
3.3 CIEĽ PRÁCE.....	30
4 MATERIÁL A POSTUP.....	31
4.1 ULTRAZVUKOVÝ PRIETOKOMER.....	31
4.2 MERACIA TRAŤ.....	33
4.2.1 NÁVRH MERACEJ TRATE.....	33
4.2.2 ZOSTAVENIE MERACEJ TRATE.....	34
4.3 VSTUPNÉ PARAMETRE PRIETOKOMERU.....	35
4.3.1 CHYBA VSTUPNÝCH PARAMETROV.....	35
4.4 HARMONOGRAM MERANIA.....	36
5 VÝSLEDKY A DISKUSIA.....	37
5.1 HISTOGRAM.....	37
5.2 LNEÁRNE TRENDY.....	38
5.3 NEISTOTA MERANIA.....	41
5.3.1 ŠTANDARDNÁ NEISTOTA MERANIA u_A	41
5.3.2 ŠTANDARDNÁ NEISTOTA MERANIA u_B	41
5.3.3 NEISTOTA MERANIA u_C	42
6 ZÁVER.....	43
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV.....	44
WEBSTRÁNKY SPOMÍNANÝCH SPOLOČNOSTÍ.....	45

1 ÚVOD

Meranie prietoku je stále výzvou pre technickú sféru. Daná problematika je z fyzikálneho hľadiska dostatočne popísaná a preto zostáva úlohou technických inžinierov skonštruovať také meradlo, ktoré bude zodpovedať požiadavkám súčasnosti. Požiadavky kladené na meradlá prietoku sú popísané v úvode nasledujúcej časti §2. Tá si kladie za úlohu čitateľa oboznámiť s najrozšírenejšími prietokomermi, princípom ich funkcie a príčinami nepresností merania. Práve presnosť, ako významná požiadavka súčasnosti je priblížená v §3. Nakoľko je sortiment prietokomerov rozsiahly, z prietokomerov bol vybratý ultrazvukový príložný prietokomer, ktorého metrologické správanie bolo podrobené experimentu opísanom v §4. K problematike presnosti merania má okrem techniky čo to povedať aj štatistika. Štatistika ponúka celú radu postupov ako vyhodnotiť merania, použité v §5. Rozhodujúcim sa ukazuje kriticky zhodnotiť významnosť zdrojov nepresností a možnosti ich redukcií. Záver bakalárskej práce (BP) §6 sa nesie práve v tomto duchu.

Metód stanovovania prietoku je mnoho, práca sa sústreďí na tie, ktoré sú aplikovateľné práve v priemysle. Z grafu (obr. 1) je možné vyčítať podiel prietokomerov pripadajúcich do jednotlivých odvetví priemyslu. Z grafu vyplýva, že energetický a vodohospodársky priemysel pojmú väčšinu zariadení na meranie prietoku. Pre zvyšok priemyslu pripadne menšia polovica. Očakáva sa, že trh s prietokomermi bude nasledujúce roky naďalej rásť [7].



Obrázok 1: *Prietokomery v priemysle* [7].

2 STATUS QUO

Obchodné a prevádzkové meradlá prietoku v súčasnosti splynuli. Tvorí jednu skupinu prietokomerov spĺňajúce nároky oboch kategórií. U obchodných meradiel sa kladie dôraz na presnosť. Prevádzkové dbajú na opakovateľnosť merania a rýchlosť odozvy. Z konštrukčného hľadiska prevádzkových meradiel je dôležitá odolnosť. Splynutie prinieslo vyrovnanie ich cien a zlepšenie metrologických vlastností prietokomerov.

Kľúčom k určeniu vhodného meradla sa stalo poznanie princípov funkcie jednotlivých metód a z nich vyplývajúce podmienky použitia. Metódy sú od seba znateľne odlišné. Výberu prietokomeru predchádza celá rada kritérií. Prvým z nich je charakter a fyzikálne vlastnosti procesnej látky. Procesná látka, nazývaná aj médium, je v prevažnej miere chápaná touto prácou ako tekutina. Tekutina je súhrnný názov pre kvapaliny a vzdušniny. V §2.2.4 sa ojedinele rozumie pod pojmom médium sypká hmota. Druhým z rady kritérií je spôsob prepravy procesnej látky. Priemyslu dominuje kruhové potrubie, v ktorom médium prúdi pod tlakom. Iná situácia je zisťovanie prietoku prúdenia s voľnou hladinou. Tretím spomenutým kritériom by boli metrologické charakteristiky meradla. Sú nimi práve spomenutá **presnosť a opakovateľnosť**, ale aj merací rozsah, a iné. Presnosť sa vyjadruje číselne, neistotou merania [1]. Opakovateľnosťou sa rozumie, ako veľmi budú zhodné výsledky pri opakovaní jedného merania. V neposlednom rade je rozhodujúca obstarávacia cena prietokomeru. Do ceny prietokomeru možno zahrnúť aj náklady spojené s jeho prevádzkou a údržbou. S cenou sa súčasne hľadá na životnosť meradla. Životnosť je obdobie, počas ktorého je zaručená jeho správna funkcia. Životnosť sa meria v prevádzkovom čase alebo v pretečenom množstve procesnej látky. Prietokomer môže byť vyradený z prevádzky neočakávaným poškodením, ktorému sa dá predísť správnym používaním, výrobcom stanoveným postupom používania. Iné prietokomery sa musia bez ohľadu na poškodenie pravidelne meniť. Je nutné pravidelne kontrolovať správnu funkciu prietokomerov. Posledné spomenuté kritérium hovorí o celkovej hospodárnosti daného prietokomeru.

Rešeršná časť BP sa striktne drží rozdelenia prietokomerov naznačených ich popredným švajčiarskym výrobcom, ENDRESS+HAUSER. V roku 2013 na konferencii ANA ich spomenutá spoločnosť rozdelila na **tradičné a moderné prietokomery** [2]. Kvalifikovane odhadovala zastúpenie oboch kategórií na trhu v pomere 1:1 [2].

2.1 TRADIČNÉ PRIETOKOMERY

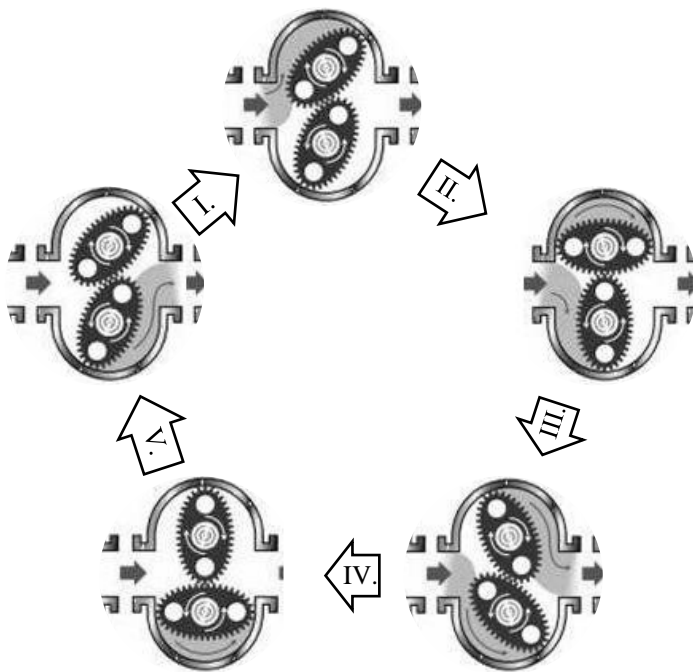
Začiatok používania tradičných prietokomerov sa datuje pred obdobie elektrifikácie. Tieto meradlá nepotrebujú k svojej činnosti napájanie elektrickou energiou. Sú založené na aplikácii poznatkov z oblasti mechaniky tekutín. Nameraná hodnota sa indikuje na mechanickom počítadle, budíku alebo sa odčíta na priloženej stupnici. Pre väčšinu priemyselných meraní je nutné prevádzať nameranú hodnotu na elektricky dátový signál. Elektrický výstup umožňuje následné spracovanie a korekciu výsledku merania. Tradičné prietokomery z pravidla obsahujú pohyblivé časti, ktoré sú najčastejšími príčinami poruchy meradla. Taktiež sa vyznačujú nezanedbateľnou tlakovou stratou (pozri §2.1.4).

2.1.1 OBJEMOVÉ PRIETOKOMERY

Prietokomery sú meradlá prietoku s kontinuálnou činnosťou. Merajú veličinu v reálnom čase. Metódy s prerušovanou činnosťou boli známe už v dávnej histórii. Jednou z takýchto metód je meranie v odmerných nádobách. So súčinným použitím hodín je možné stanoviť priemerný prietok. S nástupom mechanizácie a automatizácie bolo potrebné vymyslieť sofistikovanejšie metódy určujúce objemový prietok v reálnom čase.

Objemové prietokomery (anglicky *Positive Displacement Flowmeters*) nie sú v pravom slova zmysle prietokomermi, ale meradlami pretečeného množstva. Meranými látkami sú kvapaliny a plyny. Najčastejšie sa používajú v úlohe fakturačných meradiel ako **vodomery a plynomery**.

Bilancia odobratej vody sa v Spojených štátoch amerických meria vodomermom s nutačným diskom (angl. *Nutating Discs Flowmeter*). V tuzemských podmienkach sa viac rozšíril vodomerm s rotačným piestom (angl. *Oscillation Piston Flowmeter*). Okrem merania pretečeného objemu vody sa objemové prietokomery používajú aj pri ťažbe a spracovaní ropy. Pre takýto účel sa používajú objemové prietokomery s rotujúcimi piestami (obr. 2).



Obrázok 2: Cyklus činnosti objemového meradla s rotujúcimi piestami [10] upravené.

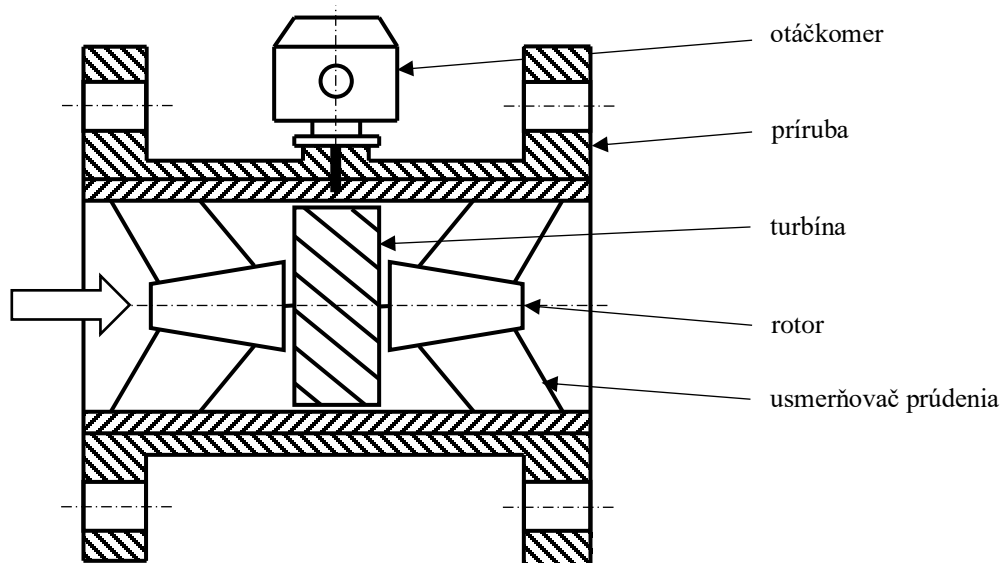
Obrázok 2 výstižne popisuje funkciu piestového meradla. Tekutina na úkor tlaku otáča dvojicou piestov. V druhej a štvrtej polohe piest vymedzí objem komory. Štvornásobok tohto objemu pripadá na jedno otočenie piestov. Počet otáčok je mechanicky alebo analógovo prevádzaný na pretečený objem. V ropnom priemysle sú používané práve piesty s ozubením (obr. 2). Zo širokej ponuky dizajnov, spolu zaberaajúcich kolies, sa používajú licované piesty v tvare laminiskáty pre meranie plynov [1]. Tolerančné triedy (menšie ako IT7) určené pre meradlá zaručujú ich vysokú

presnosť. V protiklade presnosti meradla stojí obtok. Obtok je objem tekutiny, ktorý prešiel cez meradlo bez zarátania [10].

Plynometry sa rozdeľujú podľa spôsobu tesnenia na suché alebo mokré. Mokré plynometry sa tesnia kvapalinou a prevažne ide o historický bubnový plynomer. Membránový plynomer (angl. *Diaphragm Meter*) patrí medzi suché plynometry. Jeho tesnosť je zaručená hermetickým tesnením. Dlhodobu patrí medzi najpoužívanejšie meradlá zemného plynu v distribučnej sieti na strane odberateľa. Plynometry sú okrem skúšky tesnosti aj kalibrované na meracej trati pri teplote 20°C [14]. V čase životnosti plynomeru má práve teplota zásadný vplyv na presnosť merania.

2.1.2 TURBÍNOVÉ PRIETOKOMERY

Turbínové prietokomery (angl. *Turbine Flowmeters*) premieňajú časť energie tekutiny na rotačný pohyb rotora. Podľa schémy (obr. 3) je axiálny rotor, s vhodne sklonenými lopatkami turbíny, uložený vo valivých ložiskách v osi potrubia. Uloženie je v ramenách, ktoré súčasne slúžia ako usmerňovače prúdenia [9]. Usmerňovače prúdenia sa nachádzajú pred a za turbínou. Usmerňovače prúdenia a filtre sú dôležitými komponentami potrubného systému, zaručujúcimi správnu funkciu prietokomeru. Usmerňovač je obzvlášť potrebný za ohybom potrubia, kde nie je dostatočne dlhé rovné potrubie. Rovné potrubie za ohybom slúži k ukladeniu rýchlostného profilu. Asymetrický rýchlostný profil, v dôsledku zvrátenia za ohybom, potrebuje dostatočne dlhý úsek k jeho ukladeniu, nadobudnutiu symetrie [8]. Nesymetrický rýchlostný profil prispieva k nepresnosti merania. Jedným z usmerňovačov prúdenia je Zanker, plát so symetricky rozmiestnenými otvormi [8]. Filtre zachytávajú nečistoty neprípustnej veľkosti alebo zabraňujú prechodom vzduchových bublín.



Obrázok 3: Turbínový prietokomer [9] upravený.

Pretečený objem cez rýchlostný prietokomer je priamo úmerný počtu otáčok rotora. Objemový prietok je lineárne závislý na frekvencii otáčania rotora. Frekvencia sa prenásobí kalibračnou konštantou. Kalibračná konštanta sa zisťuje experimentálne pre konkrétne médium, či už ide o kvapalinu alebo plyn. Vibrácie a trenie v uložení sú príčinou nepresností merania. Preto sa aj otáčky snímajú bezdotykovo pričom rotor je dynamicky vyvažovaný [8]. Rýchlostný prietokomer nie je schopný zaznamenávať malé prietoky z dôvodu statického trenia v uložení a preto vzniká obtok (pozri §2.1.1). Pri pozvoľnom nábehu je meradlo limitované minimálnym prietokom.

Rýchlostné vodomery majú rotor uložený radiálne k smeru prúdenia. Voda vnikajúca do priestoru vodomeru tangenciálnymi vtokmi roztáča lopatkové koleso, ktorého otáčky sú následne zaznamenávané. Podľa počtu vtokov sa rozlišujú jedno alebo viac vtokové vodomery. Citlivosť meradla závisí od počtu vtokov a lopatiek [8]. Rozlišujú sa vodomery na meranie studenej (do 30°C) a teplej vody [14]. Vodomery sú inštalované oprávnenými osobami so zreteľom na správnu inštaláciu. Životnosť vodomeroz je stanovená zákonom. Merací rozsah je dôležitým parametrom pri ich voľbe. Je daný pomerom maximálnej a minimálnej hodnoty prietoku. Široký merací rozsah sa v jednotlivých prípadoch rieši takzvaným združeným vodomermom. Ide o zapojenie dvoch vodomeroz, hlavného a vedľajšieho. Hlavný vodomerm meria pretečené množstvo pri väčších a vedľajší vodomerm pri menších prietokoch [14]. Do združených vodomeroz môžu byť zapájané i objemové vodomery (pozri §2.1.1). Možno ich zapojiť sériovo alebo paralelne, pričom súčasťou združeného vodomeru je regulačný prvok, klapka.

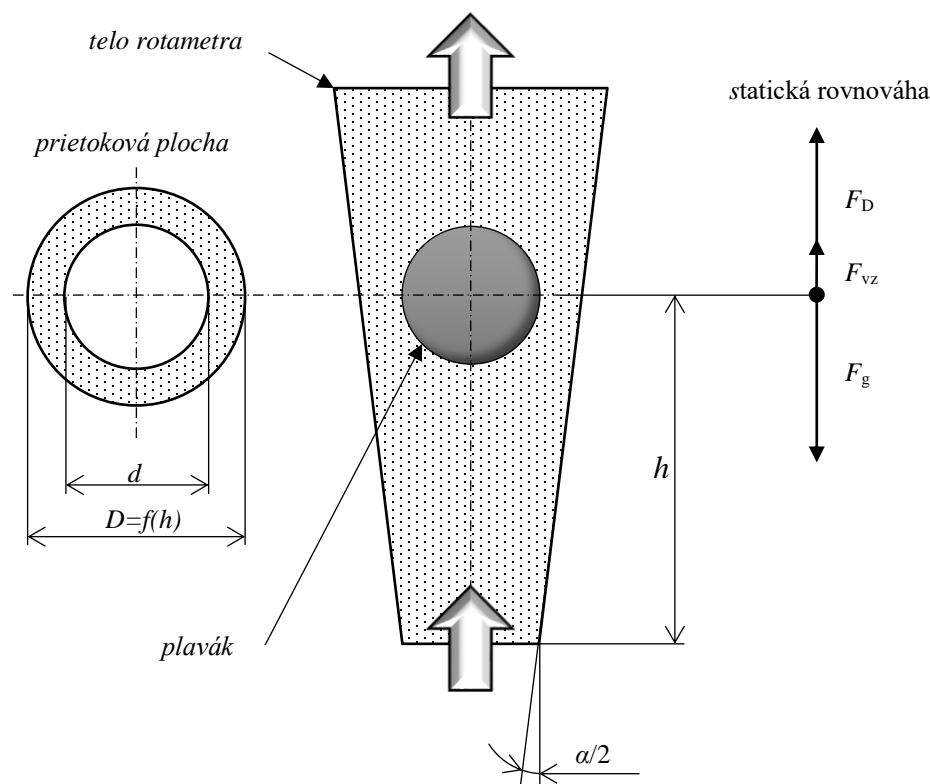
2.1.3 ROTAMETER

Prvým zo vzťahov v mechanike tekutín je **rovnica kontinuity** (1). Rovnica kontinuity vychádza zo $dm/d\tau = 0$, zákonu zachovania hmotnosti (ZZH). Rovnica, ako je vyjadrená nižšie, platí pre model ideálnej kvapaliny, ktorej predpoklad je nestráviteľnosť. Každá reálna kvapalina je viac či menej stlačiteľná a viskózna. Ideálna kvapalina je neviskózna oproti skutočnej newtonovskej kvapaline. Pre výpočet prietoku plynov malých rýchlostí a bez veľkých zmien tlaku sa môže použiť rovnica (1), inak sa pre plyny vychádza priamo zo ZZH.

$$Q = S \cdot v \quad (1)$$

Najčastejšia prietokomermi zisťovaná veličina pre výpočet objemového prietoku Q je rýchlosť prúdenia v . Ideálne je mať strednú rýchlosť, ktorá reprezentuje celý rýchlostný profil. Zo súčinu strednej rýchlosti a známej prietokovej plochy S sa vypočíta objemový prietok. V prípade funkcie rotametra, prietoková plocha je neznáma.

Rotameter je prietokomer s premenlivým prietokovým prierezom (angl. *Variable Area Flowmeter*). Konštrukcia rotametra pozostáva z rotačného plaváka a vertikálneho kužeľa. Prietoková plocha S má tvar medzikružia. Obsah medzikruží je daný vertikálnou polohou plaváka a vrcholovým uhlom kužeľa (pozri obr. 4).



Obrázok 4: Schéma rotametru.

Konštantná rýchlosť prúdenia v vychádza zo statickej rovnováhy síl pôsobiacich na plavák. Uvažujú sa iba sily vo vertikálnej osi a to sú: gravitačná sila F_g , vztlaková sila F_{vz} a ťahová sila (angl. *Drag Force*) F_D [KROHNE]. Statická rovnováha je dôvod, prečo meranie poskytuje relevantné výsledky iba pri stacionárnom prúdení. Akonáhle sa zvýši/zníži rýchlosť prúdenia, plavák je vyvedený z rovnováhy. V dôsledku nárastu/poklesu ťahovej sily je ďalej unášaný v smere výslednej sily. Plavák sa stabilizuje vo výške, v ktorej má tekutina z dôvodu zväčšenia/zmenšenia prietokovej plochy opäť pôvodnú rýchlosť. Z geometrických súvislostí zachytených na obrázku 4 vychádza kvadratická závislosť prietokovej plochy na výške h . Preto častý kónický tvar nezodpovedá lineárnej stupnici [9]. Tento nedostatok je možné vyriešiť vhodným tvarom tela rotametru alebo nelineárnou stupnicou. Telo rotametru s lineárnou stupnicou by zodpovedal paraboloid.

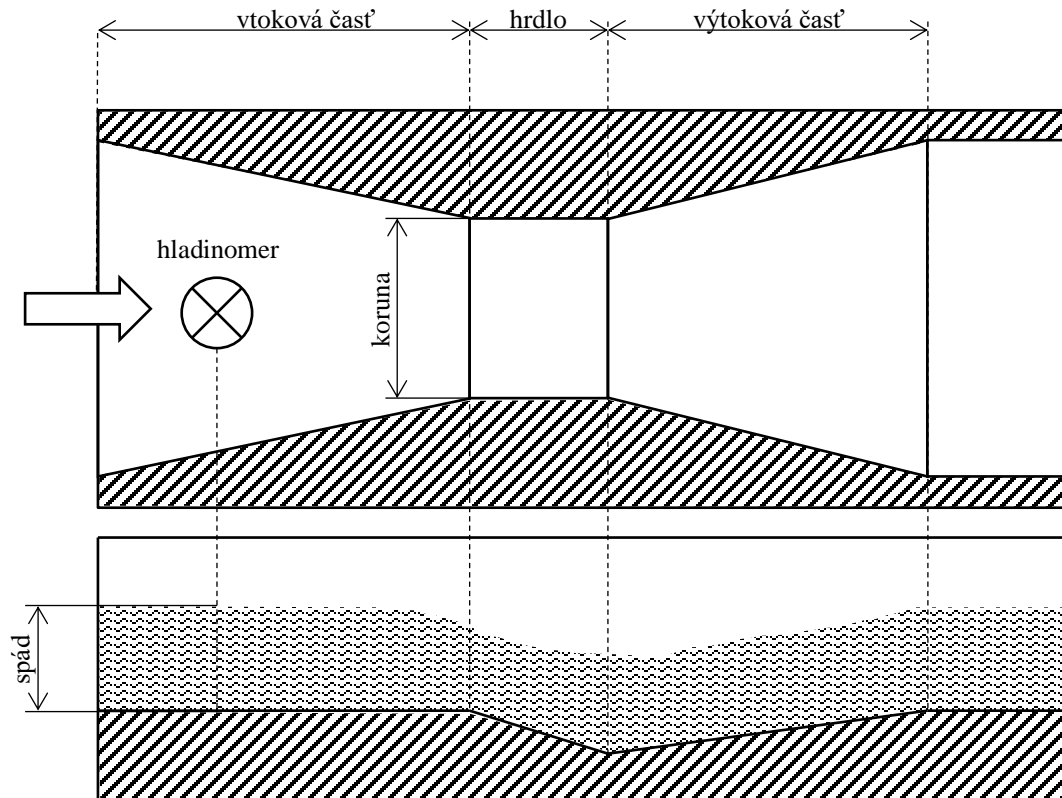
Plavák vytína na priloženej stupnici aktuálny ustálený prietok. Pre každý tvar plaváka musí byť jasné, kde sa na ňom nachádza prietok určujúca rovina. Podľa obrázku 4 to je najširšie miesto plaváka. Geometria plaváka má priamy súvis s odporovým koeficientom, ktorý je zahrnutý v ťahovej sile. Pri väčších prietokoch sa používa na zaistenie súosovosti plaváka a kužeľa vedenie alebo sa plavák vplyvom prúdenia uvádza do rotácie [8]. Materiály jednotlivých častí sú volené vzhľadom na vlastnosti média, ako sú agresivita a koróznosť tak, aby nedošlo k ich včasnému

vyraďeniu alebo zmene niektorých metrologických vlastností. Merací rozsah je daný tvarom tela rotametra a plaváka.

Okrem spomenutého vizuálneho určovania prietoku na stupnici je možné mať aj zmagnetizovaný plavák, ako ponúka anglická spoločnosť KROHNE. V tomto prevedení magnetický snímač indikuje prietok na budíku. Okrem týchto dvoch jednoduchých dizajnov je možné použiť sofistikovanejšie metódy založené na meraní výšky plaváka s väčšou presnosťou. Významné využitie je pri meraní prietoku vody a vzduchu. Avšak rotameter je možné použiť iba vo vertikálnej polohe. Je dôležité, aby sa merala tá tekutina a v tom rozsahu, ku ktorej bol rotameter určený. Táto požiadavka vychádza zo statického rozboru síl na plavák. V opačnom prípade, s dobrým vhlľadom do funkcionality rotametra je možné i takéto meranie úspešne korigovať [8].

PARSHALLOV ŽĽAB

Pre merania pretečeného množstva v otvorených korytách s voľnou hladinou sa využíva Parshallov žľab. Je určitou modifikáciou Veturiho trubice (pozri §2.1.4), v podobe kanálu. S obľubou sa využíva pri čističkách odpadových vôd a v priemyslových výtokoch [8]. Konštrukcia je pevne zasadená, jednoduchá, pozostávajúca z troch častí: vtoková, hrdlová a výtoková časť. Prietok sa určuje z výšky hladiny a dĺžky najužšieho miesta [8]. Prepočet vychádza zo známej geometrie žľabu a je numericky odvodený výrobcom pre konkrétnu geometriu žľabu. Všeobecne platia nasledujúce geometrické súvislosti (obr. 5).



Obrázok 5: Schéma Parshallovho žľabu [8] upravené.

Za vtokovou časťou s rovným dnom a dovnútra sa zbiehajúcimi stenami sa nachádza najužšie miesto — koruna. Po korune pokračuje hrdlová časť s rovnobežnými stenami. Dno hrdla je zošikmené. Keď dno dosiahne svoje minimum otvára sa výtoková časť, v ktorej dno sa pozvoľna zdvíha do pôvodnej hĺbky a steny sa rozbiehajú. Šírka koruny určuje merateľné prietoky a kategorizuje žľaby na malé a veľké (> 3 m) [8]. Meranie výšky hladiny sa realizuje vo vtokovej časti.

Inou možnosťou merania ustáleného prietoku je meranie za pomoci prepádov. Priamo meraná veličina vstupujúca do výpočtu prietoku je výška hladiny, inak nazývaná aj spád. Prepad je umelo prehradený vodný tok s vhodne navrhnutou korunou. Koruna je prepádová hrana hrádze a má najčastejšie tvar lichobežníka alebo štvorca. Priamo z výrezu v hrádzi sa určí funkčný vzťah medzi spádom a prietokom. Pre najmenšie prietoky sa používa výrez v tvare V [8]. Prepady nachádzajúce sa na povodí menších vodných tokov dopĺňujú hydrologický obraz krajiny. Presnosť merania prietoku skrz prepady ovplyvňujú faktory: presnosť merania spádu, vyhotovenie koruny, ostrosť jej hrán [9].

Meranie výšky hladiny je predmetom na celú obdobnú prácu. Pri tokoch s otvorenou hladinou sa k učeniu výšky hladiny používa vodočet (hladinomer), na ktorom hladina vytína výšku hladiny. Ďalším z rady možností merania výšky hladiny sú: tlakové, elektrické, ultrazvukové, radarové a iné hladinometry [3].

2.1.4 PRIEREZOVÉ PRIETOKOMERY

Prierezové prietokomery (angl. *Differential Pressure Flowmeters*) fungujú na meraní tlakového spádu Δp v tekutiny. Merateľný tlakový rozdiel sa docieľi umelo vloženým škrtiacim orgánom. Pri výpočte rýchlosti prúdenia sa uplatňuje **Bernoulliho rovnica** (2) pre stacionárne prúdenie ideálnych kvapalín v horizontálnom potrubí. Rýchlosť prúdenia vstupuje do rovnice kontinuity (1) a prietoková plocha je daná svetlosťou potrubia (vnútorný priemer) DN .

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \quad (2)$$

Prierezové prietokomery možno rozdeliť na normalizované a špeciálne. Norma ISO 5167¹ zahŕňa celkom šesť podtypov (okrem ďalej spomenutých *Cone meter* a *Wedge meter*). Ako vychádza z popisu funkcie, prietokomer je založený na meraní tlakového rozdielu tekutiny pred a za škrtiacim orgánom. Okrem účelne vyvolanej tlakovej strate sa na pravej strane rovnice (2) vyskytuje stratový súčiniteľ. Stratový súčiniteľ je rovný tlakovému spádu, plus dĺžkové a miestne straty. Dĺžkové straty sú odvodené od vlastností potrubia ako je jeho drsnosť. Miestne straty narastajú s divergentnosťou výstupnej časti škrtiaceho orgánu. Podľa tlakovej straty sú zostupne usporiadané: normalizovaná clona, dýza, Venturiho dýza a trubica. Normalizovaná clona a dýza sú

¹ *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full, 2019*

plechy s otvorom. Normalizovaná dýza má oproti clone malý rádius na vstupnej časti a jej výstup je predĺžený za hrúbku plechu [8]. Venturiho dýza a trubica sú potrubné časti vložené do potrubného systému pomocou prírub. Venturiho dýza má výraznú divergentnú časť a nenápadnú konvergentnú časť. Venturiho trubica je najmohutnejšia s význačným konfúzorom a difúzorom.

Spomínaná norma ďalej pojednáva o výpočte vhodnej geometrii a tlakových stratách jednotlivých škrtiacich orgánov. Výpočty sú natoľko zaužívané, že pri ich montovaní nie je potrebná dodatočná kalibrácia [9]. Numerický výpočtový softvér (napr. FLOWSOLV®) umožňuje zo vstupných parametrov navrhnuť optimálny tvar prierezového prietokomeru. Špeciálne prierezové prietokomery sú napr. štvordierová clona ponúkaná firmou EMERSON. Ide o patentované geometrie ktoré majú svoje opodstatnenie. Na meranie malých prietokov sa používajú kapilárny prietokomer [8].

Rozhodujúci je spôsob merania tlakov. Prvý tlak sa odoberá pred škrtiacim orgánom, tak aby bol zaručený neskreslený tlak v dôsledku blízkeho škrtiaceho orgánu. Druhý odber sa nachádza v najužšom mieste prúdu. V tomto mieste má prúd najvyššiu rýchlosť a najnižší tlak. Vhodná konfigurácia odberných miest tlaku a škrtiaceho orgánu umožňuje obojstranné meranie prietoku [4]. Tlak sa presne meria v U trubici alebo elektricky diferenčným tlakomerom. U trubice pred a za škrtiacim orgánom indikujú tlak, ktorý je vstupnou veličinou pre výpočet prietoku tekutiny.

Metódy tohto typu sú v globále na ústupe v prospech moderných prietokomerov [7]. Tlaková strata je značná, čo však v niektorých aplikáciách vôbec neprekáža. Predstavujú jednoduché a lacné riešenie. Ich použitie vyžaduje rovné (ukľudňujúce) potrubia pred a za prietokomerom. Pre svoje výhody a tlakovú stratu sú veľmi obľúbené hlavne v energetike na meranie mokrej a presýtenej vodnej pary [9]. V aplikáciách s nekvapalným médiom je nutné výpočet korigovať expanzívnym súčiniteľom, v ktorom je zahrnutá zmena hustoty v dôsledku expanzie za škrtiacim orgánom [8].

2.2 MODERNÉ PRIETOKOMERY

Moderné prietokomery sa vyznačujú rýchlejšou odozvou ako dôsledok ich plnej automatizácie. Rýchlosť odozvy umožňuje meranie prietoku v nestacionárnom (v čase premenlivom) prúdení. Výstup má tvar dátového signálu, ktorý spracúva výkonný procesor. Princípy merania jednotlivých metód sú založené na aplikácii hlbších poznatkov z fyziky. Na rozdiel od tradičných prietokomerov z pravidla neobsahujú pohyblivo uložené časti. Všeobecne dosahujú vyššiu presnosť ako tradičným prietokomerom. V oblasti distribučných sietí je snaha o zavedenie „inteligentnej“ siete, ktorá by obsahovala meradlá umožňujúce lepšie monitorovanie procesnej látky. Práve moderné prietokomery sú vhodné k tomuto účelu.

Ďalšou nespornou výhodou je použitie niektorých moderných prietokomerov bez nutnosti prerušenia prevádzky. V priemysle sú čoraz viac používané upevňovacie (angl. *Clamp on*) alebo zásuvné (angl. *Insertion*) prietokomery. Upevňovací priemer sa priloží z vonkajšej strany potrubia a meria priemernú rýchlosť prúdenia média. Zásuvný prietokomer sa s tesnením vkladá cez diery v hornej časti potrubia a merá rýchlosť média vo vhodne zvolenom bode.

2.2.1 VÍROVÉ PRIETOKOMERY

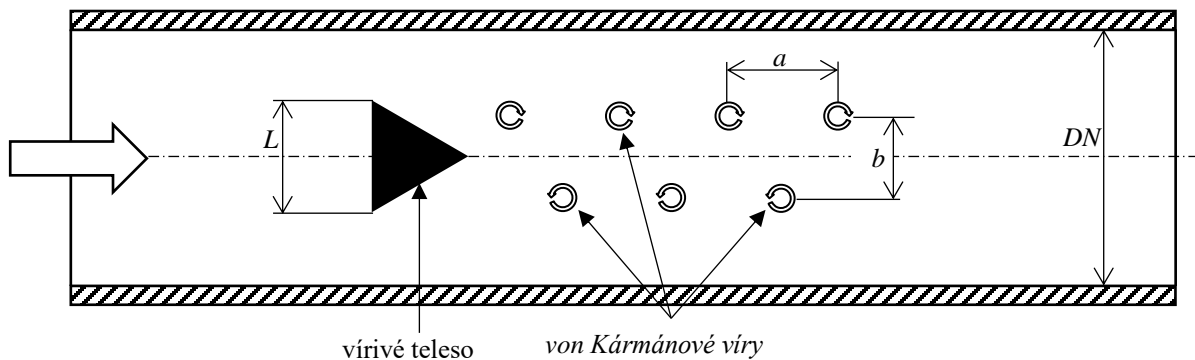
Funkcia vírových prietokomerov (angl. *Vortex Flowmeters*) je spätá s podobnostnými číslami. Podobnostné čísla sú bezrozmerné veličiny kvantitatívne popisujúce inak ťažko charakterizovateľné deje. Z oblasti mechaniky tekutín sú to napríklad **Reynoldsovo a Strouhalovo čísla** modelujúce hydrodynamické javy. Prvý spomínaný charakterizuje povahu prúdenia. Druhý popisuje tvorbu **von Kármánových vírov** [9]. Práve frekvencia f tvorby *von Kármánových vírov* je mierou objemového prietoku pri vírových prietokomerov. Do výpočtu merania vstupuje okrem frekvencie aj kalibračná konštanta, o ktorej platí, že v určitom rozsahu *Reynoldsových čísel* je konštantná. Tím je zabezpečená lineárna závislosť, ako dôležitý predpoklad funkcie prietokomeru.

Prúdenie je dominantným mechanizmus pohybu tekutiny. Celkovo je možné hovoriť o troch typoch prúdenia. Pri **laminárnom prúdení** sa tekutina pohybuje vo vrstvách, ktoré sa navzájom nepremiešavajú. **Turbulentné prúdenie** má okrem hlavnej rýchlosti v smere osi potrubia aj nezanedbateľnú flukтуаčnú rýchlosť. Vplyvom flukтуаčnej rýchlosti dochádza k miešaniu média. Medzi laminárnou a turbulentnou povahou sa nachodí **prechodové prúdenie**. *Reynoldsovo číslo* Re sa určuje zo vzťahu (3).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \quad (3)$$

Menovateľ zlomku (3) má význam trecích síl a číateľ zotrvačných síl [9]. Nízke hodnoty *Reynoldsovo čísla* značia laminárne prúdenie. Za charakteristický dĺžkový rozmer L sa volí od prípadu k prípadu iný údaj. Charakteristický dĺžkový rozmerom prúdenia tekutiny v potrubí je menovitá svetlosť potrubia. V prípade obtekania prekážky sa zvolí rozmer kolmý na smer prúdenia. Pri prúdení s hladinou je to tzv. hydraulický polomer. Hornou medzou laminárneho prúdenia je experimentálne zistené kritické *Reynoldsovo číslo*. V prípade prúdenia plne zaplneným potrubím a bežných podmienkach sa kritická hodnota pohybuje okolo bezrozmernej hodnoty 2 300 [8]. Pri prúdení nezaplneným potrubím — s voľnou hladinou, je kritická medza štyrikrát menšia. Ukazuje sa, že kritické *Reynoldsovo číslo* je podmienené režimom prúdenia. To spôsobuje, že kritická hodnota je v ojedinelých prípadoch značne odlišná od všeobecne stanovenej hodnoty.

Von Kármánové víry vznikajú pri obtekaní prekážky (angl. *Bluff Body*) vo *von Kármánovej ceste* (pozri obr. 6). Usporiadanie vírov za prekážkou je striedavé a cyklické, dané pomerom $a/b=0,28$ [9]. Tvar prekážky má zásadný vplyv na funkciu vírového prietokomeru. Tvar definujúce parametre vírového telesa sú šírka a hĺbka podstavy, ako aj ostrosť hrán. Opäť je potrebné ukludňovacie potrubie pred a za prietokomerom. Vírivé teleso je symetrická prekážka, kolmo uložená na os potrubia, v tvare hranola, prípadne valca. Kritériom voľby prekážky tvaru je rozsah rýchlostí prúdenia, v ktorom sa tvoria stabilné *von Kármánové víry*.



Obrázok 6: Schéma von Kármánovej cesty [9] upravené.

Strouhalové číslo podľa vzťahu (4) popisuje tvorbu *von Kármánových vírov* frekvenciou odtrhania vírov od prekážky. Charakteristickým dĺžkovým rozmerom L je šírka vírivého telesa (obr. 6), ktorá má z troch vyššie spomenutých tvarových parametrov najpodstatnejší vplyv. *Strouhalové číslo* zvoleného tvaru vírivého telesa sa zisťuje experimentálne v závislosti na charaktere prúdenia. Zo závislosti *Strouhalovom čísle* na *Reynoldsovom čísle*, konkrétneho vírivého telesa, je možné určiť interval *Reynoldsových čísel*, v ktorých aproximálne nadobúda *Strouhalového číslo* konkrétnu hodnotu. Pevné *Strouhalové číslo* je zábezpekou stabilnej kalibračnej konštanty. Vyjadrením rýchlosti zo vzťahu (4) a rovnice kontinuity (1) sa dôjde k predpisu pre výpočet prietoku v závislosti na frekvencii tvorby *von Kármánových vírov*.

$$St = \frac{f \cdot L}{v} \quad (4)$$

Otázka meranie prietoku vírovým prietokomerom prechádza na priame zaznamenávanie frekvencie vírov. Snímanie frekvencie vírov sa uskutočňuje tlakovo, tepelne alebo opticky [8]. Mechanické snímanie neprichádzajú do úvahy z dôvodu nežiadúceho výskytu pohyblivých častí pri moderných prietokomeroch. Najčastejšie používaný spôsob je práve tlakový piezoelektrický snímač v závese uloženia vírivého telesa [9]. Piezoelektrický snímač (polovodič) vplyvom vlastnej deformácie indikuje napätie [8]. Vírivé teleso sa nadvihuje v dôsledku odtrhania vírov a tlakovo pôsobí na piezoelektrický snímač. Ten vysiela napäťové impulzy s frekvenciou *von Kármánových vírov*.

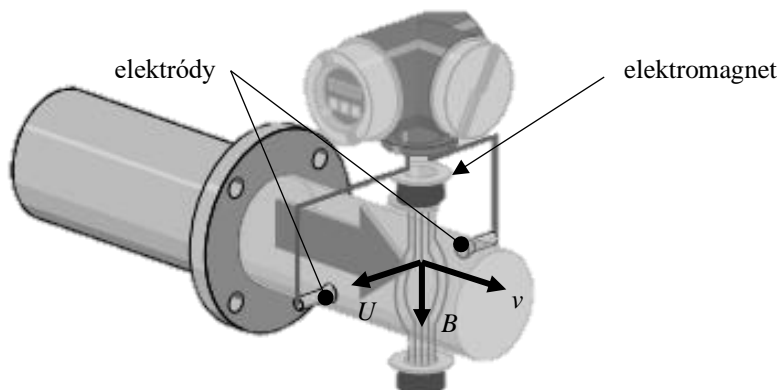
Z pojednania vyššie vyplýva, že vírové prietokomery pracujú iba v určitom rozsahu rýchlostí. Minimálny merateľný prietok je daný vznikom stabilnej *von Kármánovej cesty*. Vírové prietokomery nepodávajú relevantné informácie v čase nábehu/dobehu. Možnosťou je použitie vírových prietokomer s redukovanou svetlosťou, ktoré sa vložia do potrubného systému. Zúžením priemeru potrubia narastie rýchlosť podľa Bernoulliho rovnice (2) a tak je možné zaznamenávať aj menšie prietoky. Nezriedka sa vyhotovujú v podobe zásuvných prietokomerov [9]. Svoje uplatnenie nachádzajú pri meraní tekutín, plynov a pár, s obmedzeným meracím rozsahom.

2.2.2 ELEKTROMAGNETICKÉ PRIETOKOMERY

Elektromagnetické EM prietokomery (angl. *Electromagnetic flowmeters*), tiež nazývané indukčné, pokrývajú okolo 25% trhu s prietokomermi [7]. Priemyselné EM prietokomery sú obšírne spracované normou ISO 20456². Princíp ich funkcie možno vysvetliť pomocou *Faradayovho zákona elektromagnetickej indukcie*:

„Elektrické napätie sa indukuje vo vodivej slučke ak sa v čase mení magnetický indukčný tok prechádzajúci touto slučkou.“

Priamo meraná veličina je elektrické napätie U . Je nutné aby vektor indikovaného napätia ležal kolmo na magnetické pole a súčasne kolmo k smeru rýchlosti prúdenia (obr. 7). Magnetické pole, dané magnetickou indukciou B , by malo byť homogénne a konštantné [8]. Aby nedochádzalo k rušeniu poľa, používa sa nemagnetické potrubie. Ak je potrubie aj elektricky nevodivé, nie je potrebná izolačná vrstva na vnútornom plášti potrubia.



Obrázok 7: Základné súčasti elektromagnetického prietokomeru [7] upravené.

Po splnení týchto predpokladov sa rýchlosť prúdenia v , ako vstup pre výpočet prietoku, vypočíta z rovnice (5). Pár elektród môže byť kontaktný alebo kapacitný [9]. Kontaktné elektródy sú v bezprostrednom styku s médiom a tak sa stávajú najčastejšou príčinou poruchy. Môže dôjsť k ich abrazívnemu poškodeniu, prípadne pri neoptimálnych prevádzkových podmienok k ich chemickej korózii. Variantom je použiť kapacitné elektródy, ktoré sú za izolačnou vrstvou a umožňujú merať prietok aj v nezaplnenom potrubí [9].

$$U = B \cdot D \cdot v \quad (5)$$

Napätie sa indukuje v dôsledku prúdenia **vodivého média** v magnetickom poli. Médium môže byť kvapalina, ale nie plyn ako taký. Okrem kvapalného média je možné merať dostatočne premiešané zmesi, aby bola zaistená izotropná vodivosť celého média. Pripadajú do úvahy zmesi kvapalina—kvapalina, kvapalina—plyn [9]. Nemerateľné sú napr. demineralizovaná

² *Measurement of conductive liquid flow in closed conduits — Method using electromagnetic flowmeters, 2017*

a deionizovaná voda ako časté suroviny farmaceutického a chemického priemyslu, ako aj ďalšie oleje a organické látky [9]. Vyššie spomínaná norma sa nezaobrá meraním prietoku roztavených kovov, na ktoré sa EM prietokomery s obľubou využívajú. Medzi ich prednosti patrí necitlivosť voči viskozite a hustote média, pričom nespôsobujú tlakové straty. Taktiež umožňujú merať prietok v oboch smeroch [7].

Homogénne elektromagnetické pole je dané magnetickou indukciou B . Presnosť meradla sa teda podmieňuje konštantnou a homogénnou magnetickou indukciou. Na vytvorenie požadovaného elektrického poľa sa využívajú elektromagnety napájané stabilným prúdom zo zdroja. Elektromagnety sa napájajú impulzným jednosmerným prúdom DC alebo striedavým prúdom AC [3]. DC napájanie má oproti AC pomalšiu odozvu. Najvhodnejší sa ukazuje lichobežníkové AC napájanie produkujúce lichobežníkový priebeh magnetickej indukcie [8]. EM prietokomery sa vyrábajú aj v zásuvnom prevedení.

2.2.3 ULTRAZVUKOVÉ PRIETOKOMERY

Ultrazvukové UZ prietokomery (angl. *Ultrasonic flowmeters*) využívajú na meranie prietoku mechanické ultrazvukové vlny. Zvukové vlny s frekvenciou nad 20 kHz sú ľudským sluchom nezachytiteľné. Zariadenia, ktoré ich vedú vysielat' a prijímať sú elektroakustické meniče [8]. Tie najčastejšie pracujú na princípe *piezoelektrického javu*. Mechanické vlny sa šíria postupným rozkmitaním častíc prostredia. Prostredie je charakterizované impedanciou, útlmom a rýchlosťou šírenia zvuku [8]. Zvuková vlna sa šíri v pozdĺžnom a priečnom (kolmom) smere od zdroja. Intenzita vlny exponenciálne klesá v dôsledku útlmu po dráhe [8]. Impedancia sa prejaví na rozhraní dvoch prostredí. Tu sa časť energie vlny odrazí a časť prepustí do druhého média. Na rozhraní sa vlna odrazí pod uhlom dopadu α . UZ vlna podlieha obdobným prírodným zákonom ako elektromagnetická vlna (svetlo). Prepustená UZ vlna, priečna aj pozdĺžna, sa riadi *Shellovým zákonom*, ktorý hovorí: $\sin(\alpha)/\sin(\beta) = c_A/c_B$ [8]. Uhol α , ako je napísané vyššie, je uhol dopadu a smer prepustenej vlny je odklonený pod uhlom β od normály rozhrania. Index A, rýchlosti šírenia zvuku c , označuje prostredie, z ktorého vlna prichádza. Rýchlosť šírenia zvuku v prepustenom prostredí je označená ako c_B . Anizotropný charakter šírenia zvuku v tuhých látkach hovorí o rozdielnej rýchlosti v smere pozdĺžnom a priečnom. Rýchlosť šírenia zvuku v tuhých látkach je závislá od jej mechanických vlastností. V prípade merania prietoku v tekutinách je rozhodujúci objemový modul pružnosti a teplota procesnej látky (tab. 1.).

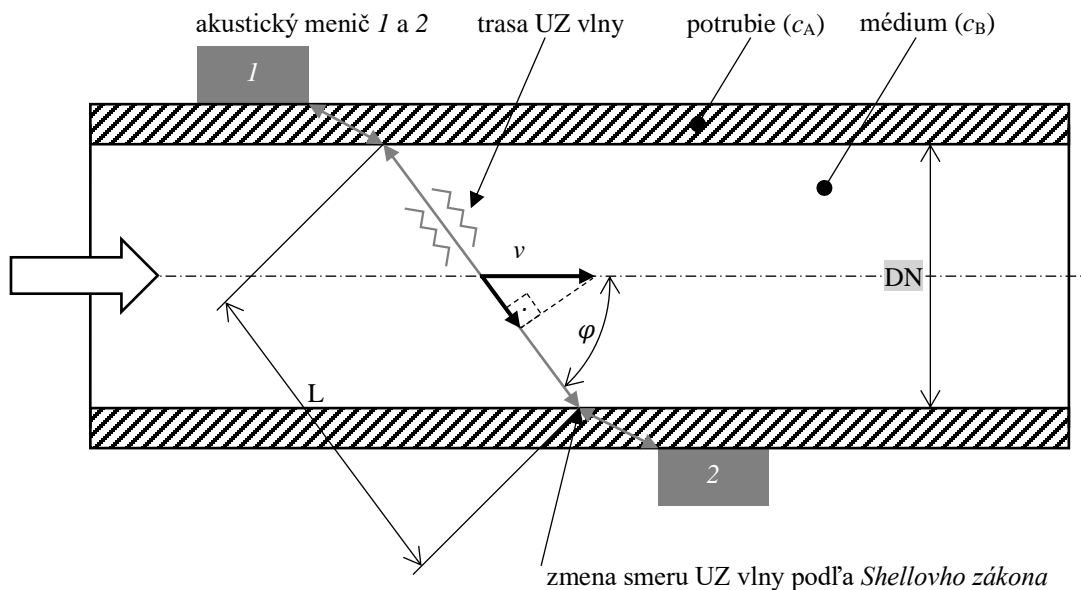
Tabuľka 1: Rýchlosť šírenia zvuku vo vode [5].

Teplota [°C]	Rýchlosť zvuku c_{H_2O} [m/s]
15	1 466
20	1 482
25	1 497

V súčasnosti sú používajú dve metódy využívajúce UZ vlny. Sú nimi: **metóda časovej diferencie** a **metóda využívajúca Dopplerov efekt**. UZ prietokomery možno nasadiť okrem plne zaplnených potrubí i na meranie prietoku s hladinou.

ULTRAZVUKOVÉ PRIETOKOMERY ZALOŽENÉ NA ČASOVEJ DIFERENCIE

Prietokomery využívajúce časovú diferenciu priamo merajú čas, za ktorý vlna prejde po smere a protismere prúdu. Vyrábajú sa v dvoch konštrukčných prevedeniach, ako omočené (angl. *Inline*) alebo upevňovacie (angl. *Clamp on*) (obr. 8).



Obrázok 8: Schéma upevňovacieho ultrazvukového prietokomeru.

Elektroakustické meniče 1 a 2 pracujú striedavo ako prijímač a vysielač. Menič 1 je vysielač po smere prúdenia a prijímač protismere prúdenia. Menič 2 je vysielač protismere a prijímač po smere prúdenia. Absolútna rýchlosť UZ vlny po smere prúdenia je väčšia ako v protismere. Z tejto úvahy vystáva vzťah (6).

$$\tau_{12;21} = \frac{L}{c \pm v \cdot \cos(\varphi)} \quad [9](6)$$

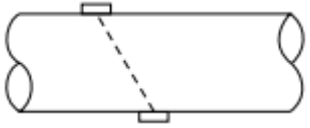
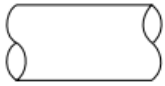


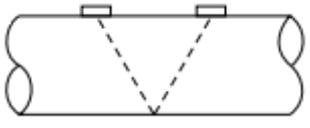
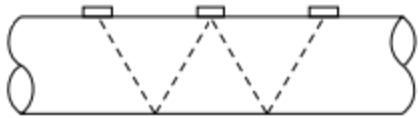
Časovou diferenciou sa myslí: $\Delta\tau = \tau_{21} - \tau_{12}$. Za všeobecne platného predpokladu $c^2 \gg v^2$ a geometrických závislostí (obr. 8) je možné odvodiť vzťah (7) pre strednú rýchlosť prúdenia. Tento vzťah v sebe nezahŕňa rýchlosť zvuku v danom prostredí, ktorá sa vylúčila súčinom $\tau_{21} \cdot \tau_{12}$. Inverzné dopočítanie rýchlosti šírenia zvuku sa používa v aplikáciách identifikácie tekutín [9].

$$v = \frac{L}{2 \cdot \cos(\varphi)} \cdot \left(\frac{1}{\tau_{12}} - \frac{1}{\tau_{21}} \right) \quad (7)$$

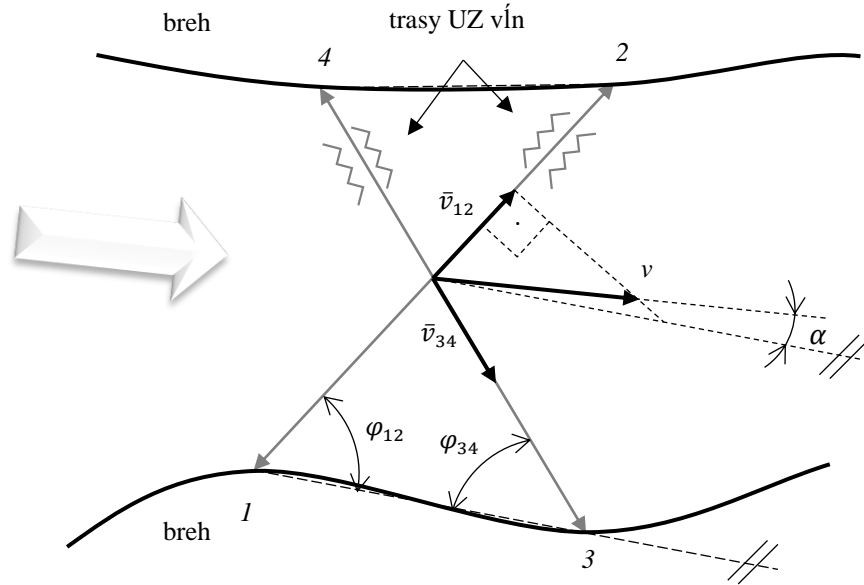
Spomenuté vzťahy platia v prípade omočených UZ prietokomerov. V prípade upevňovacích prietokomerov treba UZ vlnu najprv prejsť od meniča 1 k vnútornej stene potrubia. Následne sa zlomí pod uhlom β , podľa *Shellonovho zákona*, a ďalej putuje skrz médium k protiľahlej stene potrubia. Tam sa opäť zlomí smerom k meniču 2. To isté sa opakuje v reverznom postupe vlny od meniča 2 k 1. Čas prechodu vlny cez steny potrubia treba kompenzovať v procesore alebo zahrnúť v kalibrácii.

Pri väčších priemerov potrubia s nesymetrickým rýchlostným profilom sa používajú viacúrovňové (najskôr trojúrovňové) konfigurácie [9]. Nerovnomernosť rýchlostného profilu má zásadný vplyv na presnosť merania. Dvojice akustických meničov sa zapoja v rovinách tak, aby bol čo najlepšie zachytený rýchlostný profil. Okrem priameho vysielania UZ vlny zo snímača k snímaču je možné spracovávať odrazenú vlnu od vnútornej steny potrubia (tab. 2). Takáto možnosť je v prípade omočených aj upevňovacích prietokomerov. Výhodou je predĺženie dráhy, na ktorej sa s väčšou citlivosťou prejaví časová diferencia. Takýto spôsob prináša riziko nezachytenia primárnej UZ vlny meničom. Na dlhšej dráhe sa výraznejšie prejaví útlm. Používané konštelácie sú do Z, V a W. Konštelácia dvoch meničov rozhoduje o dĺžke dráhy, jednotlivé závislosti je možné vyčítať z tabuľky 2.

Tabuľka 2: Schémy konštelácie detektorov UZ prietokomerov [6] upravené.

Konštelácia	Schéma	Legenda
Z		 potrubie  dráha UZ vlny  snímač
V		
W		

Meranie prietoku s voľnou hladinou, metódou časovej diferencie UZ vln, je progresívna metóda. Používa sa všade tam, kde je snaha operatívne zistiť prietok umelých alebo prírodných vodných tokov. Je možné s určitým zjednodušením hovoriť o dvojrozmernom prúdení. Zjednodušenie sa týka predpokladu, že jednotlivé vrstvy vody akoby prúdili po sebe a navzájom sa nepremiešavali. Je úplne bežné, že v takýchto prípadoch nie je hlavný smer prúdenia známy [11]. To je dôvod, prečo by použitie jednej dvojice meničov značne skreslilo meranie. Skreslenie je teda zapríčinené neznalosťou hlavného smeru prúdenia danej vrstvy. K určeniu hlavného smeru a rýchlosti prúdenia vodného toku posluží krížová konfigurácia UZ senzorov (pozri obr. 9).



Obrázok 9: Krížová konfigurácia ultrazvukového prietokomeru [11] upravené.

Krížová konfigurácia podáva informáciu o veľkosti a smere rýchlosti prúdenia. Je doplnená o druhý pár, nezávisle pracujúcich akustických meničov 3 a 4. Kríž leží v rovine, v ktorej určujeme smer a rýchlosť prúdenia, rovnobežnej s hladinou. Smer je daný uhlom odklonu α od myslenej rovnobežky so spojnicou senzorov 1 a 3. Uhol je odvodený z geometrických súvislostí podľa obrázku 9. Vzťah (8)³ pre určenie uhlu α , a následne rýchlosti prúdenia, vychádza zo vzťahu (7) a spomenutých geometrických súvislostí platiacich pre krížovú konfiguráciu.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\bar{v}_{34} \cdot \cos(\varphi_{12}) - \bar{v}_{12} \cdot \cos(\varphi_{34})}{\bar{v}_{12} \cdot \sin(\varphi_{34}) + \bar{v}_{34} \cdot \sin(\varphi_{12})}\right) \quad (8)$$

Jednoúrovňová krížová konfigurácia je nedostatočná pri členitom rýchlostnom profile vodného toku. Zvyšovaním počtu úrovní sa spresňuje výpočet objemového prietoku vodného toku. Zvyšovaním počtu úrovní sa prietoková plocha koryta rozdelí na pásy s príslušnou rýchlosťou. Výpočet sa ďalej koriguje podľa normy ISO 6416⁴. Korekcia sú realizované rýchlostným a kalibračným koeficientom. Rýchlostný koeficient je volený ako tabuľková hodnota v závislosti od pomeru hĺbky zmeranej rýchlosti v a celkovej hĺbky dna koryta [11]. Kalibračným koeficientom sa meranie koriguje experimentálne zistenou odchylkou od skutočného rýchlostného profilu toku. Rýchlostný profil ovplyvňujú parametre ako „drsnosť“ dna a vetry na hladine. Kalibrácia prebieha hydrometrovaním, to je zisťovanie rýchlosti prúdenia v bodoch [11]. Zdrojom narastajúcej neistoty merania môže byť interferencia vln, nehomogenita média a schopnosť presne merať čas [11].

³ $\cos(x + y) = \cos(x) \cdot \cos(y) - \sin(x) \cdot \sin(y) \wedge \cos(x - y) = \cos(x) \cdot \cos(y) + \sin(x) \cdot \sin(y)$

⁴ *Hydrometry — Measurement of discharge by the ultrasonic transit time (time of flight) method, 2017*

ULTRAZVUKOVÉ PRIETOKOMERY ZALOŽENÉ NA DOPPLEROVOM EFEKTE

Objemový prietok nehomogénnych médií sa meria UZ metódou založenej na *Dopplerovom jave*:

„*Frekvencia vlny sa v dôsledku relatívneho pohybu zdroja a pozorovateľa zmení*“

Nehomogenity predstavujú plynné bubliny alebo pevné častice [3]. Dostatočne rozptýlené nehomogenity sú podmienkou správnej funkcie tohto typu UZ prietokomerov. Optimálny je hmotnostný podiel do 45% [8]. Taktiež je dôležité aby boli rovnomerne rozptýlené v celom priereze potrubia. To vylučuje meranie prietoku kaší. Tento typ sa podobá značkovacím (korelačným) metódam merania prietoku. V nich ide o vstrekovanie značkovacej látky (napr. farbivo alebo tepelná značka) priamo do prúdiacej tekutiny. Následne sa zaznamenáva rýchlosť značkovacej látky, z ktorej sa vyhodnotí prietok. Dopplerovské prietokomery v podstate merajú taktiež rýchlosť značkovacích látok, ktoré sa v médiu prirodzene nachádzajú. Hodnovernosť merania podporuje, keď ultrazvukový signál prechádza skrz celý priemer potrubia. Pri vyšších zhlukoch nehomogenít sa meranie zaťažuje chybou [8].

Rýchlosť tekutiny sa určuje z rozdielu frekvencie vysielanej a prijímajúcej UZ vlny. Frekvencia sa zmení v dôsledku relatívneho pohybu zdroja a pozorovateľa. V prípade meraní prietoku v potrubí je zdroj pevný, pohybuje sa pozorovateľ (nehomogenita). Dopplerovské prietokomery pre meranie v tlakových potrubíach sa taktiež vyrábajú ako omočené alebo príložné. Obdobne je prítomný vysielateľ a prijímač. V niektorých prevedeniach pracuje jeden akustický menič v impulznom režime a zbytok času je prijímač. Spracovanie signálu procesorom zo senzorov berie ohľad na polohu nehomogenity v priereze potrubia. Takouto metódou a dodržaním predpokladov je možné spoľahlivo získať strednú rýchlosť prúdenia .

Dopplerové prietokomery je možné nasadiť aj na meranie prietoku s hladinou. V nezaplnenom potrubí sú prietokomery využívajúce *Dopplerov jav* nainštalované na dne potrubia. Prietokomer obsahuje dva akustické meniče, pracujúce striedavo v režime vysielateľa a prijímača. Tento cyklus sa opakuje niekoľko stokrát za sekundu. Prvý senzor slúži ako hladinomer [3]. Meraná výška hladiny vytkne pri známej geometrie potrubia (kanálu) prietokovú plochu. Druhý menič po vysielaní sa prepne do režimu, v ktorom prijíma odrazené a frekvenčne posunuté UZ vlny. V lúči vysielanej UZ vlny sa nehomogenita nachádza niekoľko cyklov meniča, to umožňuje určiť rýchlosť týchto častí v reálnom čase. Z nameraných a procesorom spracovaných dát sa vytvorí jednorozmerný rýchlostný profil [3]. Integráciou rýchlostného profilu cez prietokovú plochu sa numericky vyčíslí celkový objemový prietok.

Na najväčších vodných plochách sa na určovanie rýchlostného profilu používajú zariadenie ADCP⁵. Principiálne fungujú obdobne ako bolo opísané v prípade nezaplneného potrubia, s tým rozdielom, že mapujú 3D rýchlostný profil. Spoločnosť TELEDYNE TECHNOLOGIES ponúka zariadenie toho typu s dosahom až 1km.

⁵ *Acoustic Doppler current profiler*

2.2.4 CORIOLISOVÉ PRIETOKOMERY

Meranie hmotnostného prietoku Q_m oslobodzuje meranie od vplyvu teploty a tlaku. Prevod medzi objemovým a hmotnostným prietokom je cez hustotu procesnej látky. Tieto spôsoby určovania hmotnostného prietoku sú nepriame metódy s dodatočným meraním hustoty média. Meranie hmotnosti sa ukazuje zaťažené menšou chybou ako meranie objemu. Pri kalibrácii prietokomerov sa používajú váhy na určenie menovitého prietoku.

Medzi najrozšírenejšie metódy priameho merania hmotnostného prietoku patria Coriolisové prietokomery (angl. *Coriolis mass flowmeter*). Funkcia prietokomeru je založená na vzniku Coriolisovej sily. Coriolisová sila vzniká pri zloženom pohybe hmoty. Zložený pohyb pozostáva z rotačného unášavého pohybu a relatívneho translačného (priamočiareho) pohybu. Zloženým pohybom začne na hmotu pôsobiť zrýchlenie, v ktorého smere bude ležať aj Coriolisova sila. Smer a veľkosť Coriolisovej sily je poznať z rovnice (9).

$$\vec{F}_{cor} = 2 \cdot m \cdot (\vec{v}_{rel} \times \vec{\omega}_{un}) \quad 9$$

Coriolisové prietokomery sú budené kmitavým unášavým pohybom. Kmitavý pohyb je ekvivalentný rotačnému pohybu, daný uhlovou rýchlosťou ω_{un} . Rozdiel je v periodickom menení orientácie vektoru Coriolisovej sily. Kvapalina v potrubí prúdi rýchlosťou v_{rel} . Ak by sa vzťah (9) vhodne upravil a vyjadril by sa hmotnostný prietok, nastala by potreba merať prírastok Coriolisovej sily [9]. To by bola úloha zavše náročná.

Väčšina dnešných prietokomerov tohto druhu funguje na meraní výchylky. Coriolisová sila na ramene vyvoláva moment, ktorý sa prejaví skrútením trubice. Trubica teda musí byť z pružného materiálu. Bežne sa trubice vyrábajú v tvare písmen U, oblúka alebo iné. Zakrivenie trubice prináša necitlivosť k zvonka prichádzajúcim rušivým vibráciám a pulznému prúdeniu [9]. Nevýhodou zakrivených trubíc je poškodenie v dôsledku namáhania ohybom a obtiažnejšia sanitácia usadenín v trubici. Alternatívou sú priame vibrujúce trubice, ktoré nespôsobujú väčšiu tlakovú stratu [3]. Nevýhodou bude nepriaznivé prenášanie vibrácií na celý potrubný systém [3]. Ak trubicou neprúdi médium nedochádza k skrúteniu a všetky body trubice prechádzajú v jednom okamihu vzťahnou rovinou. Ak však médium prúdi v trubici a tá je budená kmitavým pohybom dochádza k skrúteniu. Skrútenie sa prejaví fázovým posunom dvoch sledovaných bodov. Sledované body trubice sú rovnobežné s vektorom unášavej rýchlosti. Fázové posunutie sa sníma detektorom polohy. U zakrivených trubíc sa používajú indukčné senzory a pri rovných optické poskytujúce vstupy pre vyjadrenie hmotnostného prietoku [8].

Coriolisové prietokomery s dvojicou trubiek umožňujú merať hustotu procesnej tekutiny. To sa deje z porovnania dvoch fázových posunov v jednom okamihu. Znalosť hustoty média umožňuje automatický prepočet na objemový prietok. Procesná tekutina môžu byť kvapaliny ako aj plyny. Kvapaliny s obsahom bubliniek značne skresľujú meranie. Z tohto dôvodu je vhodné prietokomer upevňovať do polôh odporúčanými výrobcami. Nepotrebuje ukladajúcu časť, nakoľko sú necitlivé k tvaru rýchlostného profilu. Jedná sa o značne presný prietokomer.

CORIOLISOVÉ PRIETOKOMERY SYPKÝCH HMÔT

Práca sa okrajovo dotkne nie tekutých médií. Sú nimi sypké a granulové látky využívané v najrozličnejších odvetviach priemyslu. Okrem samotného váženia a následného zavážania je často potrebné operatívne riadenie dodávaného množstva. Tomu napomáhajú kontinuálne váhy alebo prietokomery. Prietokomery s odrazovou alebo sklznou doskou nevykazujú najlepšiu presnosť [9]. Ináč je tomu v prípade Coriolisových prietokomerov sypkých hmôt.

Fyzikálna podstata takého meradla je totožná s Coriolisovým prietokomerom pre tekuté látky. Rozdiel je v konštrukcii. Tá pozostáva z motora roztáčajúceho dosku vybavenú vodiacimi lopatkami [9]. Sypká hmota dopadá na dosku a je vedená k jej hrane kde opúšťa prietokomer. Meraná látka unášaná doskou a pohybujúca sa smerom od stredu k okraju vyvoláva v dôsledku Coriolisovej sily reakčný moment. Miera reakčného momentu je úmerná hmotnostnému prietoku.

2.2.5 TERMÁLNE PRIETOKOMERY

Termálne prietokomery (angl. *Thermal Mass Flowmeters*) sa nasadzujú na priame meranie hmotnostné prietoku tekutín. Najčastejšie sú uplatnené pri meraní plynov pri malých hmotnostných prietokoch. Fyzikálna podstata termálnych prietokomerov je v prenose tepla. Prenos tepla je podmienený vlastnosťami plynu: tepelná vodivosť, hustota, viskozita a tepelná kapacita tekutiny. Tieto veličiny musia byť zohľadnené pri kalibrácii prietokomeru. Prestup tepla sa deje: vedením, prúdením a žiarením. Z práve uvedených spôsobov sa najviac realizuje vedením a následne prúdením [4]. Termálne prietokomery sú založené na princípe funkcie žeraviaceho anemometra (angl. *Hot Wire Anemometer*) [8]. Pevná látka sa ochladzuje tým rýchlejšie čím okolo nej rýchlejšie prúdi prostredie.

Výsuvný termálny prietokomer od spoločnosti SIERRA je vybavený meracou a procesorovou časťou. Meracia časť je sonda, pozostáva z dvoch tyčových senzorov, teplotný a rýchlostný. Teplotný senzor meria aktuálnu referenčnú teplotu média nezávisle na rýchlosti prúdenia tekutiny. Rýchlostný senzor je permanentne zahrievaný na konštantnú teplotu (stanovená výrobcom). Akonáhle prúdi médium skrz potrubie, teplota z rýchlostného senzoru prechádza na obtekajúce molekuly a senzor sa ochladzuje. Ochladenie sa meria a kompenzuje premenlivým napájacím prúdom. Hmotnostný prietok je úmerný spotrebovanému elektrickému príkonu. Druhou variantnou je udržiavať konštantný prúd a merať teplotný rozdiel. V takomto prípade bude teplotný rozdiel väčší čím väčší bude prietok.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEL PRÁCE

3.1 ANALÝZA PROBLÉMU

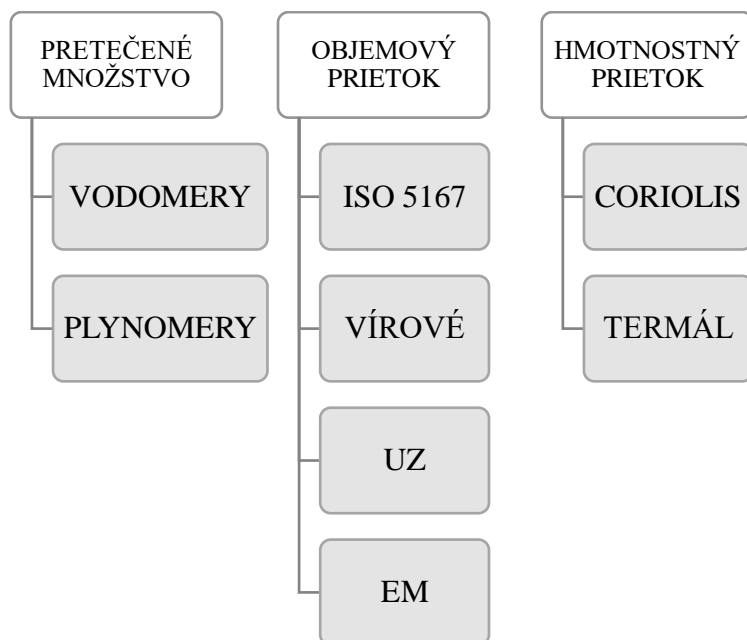
Ako bolo v úvode BP naznačené je dlhotrvajúca snaha o zdokonalenie už známych metód merania prietoku, prevažne tých moderných. Zdokonalenie spočíva vo vlastnostiach, ktoré by vyhovovali širokému záberu použitia. Napĺňanie takejto tendencie nesmie byť na úkor iných. Kľúčovou metrologickou vlastnosťou je presnosť. Veľké množstvo svetových výrobcov sa predbieha s najpresnejším prietokomerom. **Presnosť merania** je podmienená množstvom vplyvov, z ktorých sa niektoré dajú stanoviť a iných vplyv sa iba odhaduje. Iné sú náročne kvantifikovateľné a vie sa iba o ich vplyve na nameranú hodnotu.

Neistota je kvantitatívnym vyjadrením presnosti [1]. Ak sa hovorí o meradle, zahŕňa okrem samotnej presnosti aj ostatné metrologické vlastnosti meradla, ako opakovateľnosť, lineárnosť a iné. Filozofia neistoty je dôležitá vzhľadom na jednotné posudzovanie presnosti meradiel. Zavedenie metodológie neistoty nastalo koncom minulého tisícročia, ale iba sťažka sa dostáva do slovníka priemyselnej sféry. Pritom komerčný sektor je motorom vývoja prietokomerov. Nezriedka výrobcovia uvádzajú presnosť svojich produktoch vyjadrenú chybou a nie za pomoci neistoty. Chyba merania vyjadruje odklon od skutočnej hodnoty. Tu nastáva problém s pojmom **skutočná hodnota**. Skutočnú hodnotu nie je možné určiť a preto sa nahrádza aritmetickým priemerom nameraných hodnôt. Takáto hodnota sa bude nazývať stredná hodnota. Pre objektívne vyjadrenie presnosti je vyjadrenie chyby nedostatočné.

Rozlišujú sa tri typy chýb merania: hrubá, náhodná a systematická. Môžu sa vyjadriť relatívne alebo absolútne. Absolútne vyjadrenie spočíva v pevnej hodnote s príslušnými jednotkami. Relatívna chyba sa vyjadruje podielom absolútnej chyby so strednou hodnotou, alebo meracím rozsahom. **Hrubá chyba** je spôsobená nepozornosťou alebo neznalosťou osoby. Príkladom by mohlo byť používanie dvojakého jednotkového systému. Americkí výrobcovia by uvádzali dĺžkové a hmotnostné parametre prietokomeru v imperiálnych jednotkách a zákazník by ich považoval za jednotky európskeho typu. Iná hrubá chyba bola naznačená v §2.1.3, kde by pozorovateľ nepoznal vzťažnú rovinu plaváku, podľa ktorej má odčítať prietok. **Náhodnej chybe** nie je možné sa vyhnúť. K jej stanoveniu je potrebné vykonať určitú sériu opakovaní merania. **Systematická chyba** pôsobí proporcionálne zmenšenie/zväčšenie, alebo posúva strednú hodnotu merania.

3.2 ANALÝZA A ZHODNOTENIE REŠERŠE

Rešeršná časť BP (§2) mala za cieľ rozdeliť a popísať princíp funkcie jednotlivých prietokomerov, ako aj podtrhnúť faktory ovplyvňujúce neistotu merania. Zvolené rozdelenie sa ukázalo ako spoľahlivé a určujúce podstatu veci. Dostali sa do popredia vlastnosti oboch skupín. Je možné hovoriť o moderných prietokomeroch ako o presnejších, ale vždy závisí od porovnania konkrétnych modelov prietokomerov a postupov merania. Okrem použitého rozdelenia bola možnosť prietokomery kategorizovať podľa meranej veličiny (pozri obr. 9).



Obr. 9.: Klasifikácia prietokomerov podľa meranej veličiny.

Téma prietokomerov je značne obsažná a dobre preskúmaná. Podkladmi pre vypracovanie rešeršnej časti BP boli príslušné normy, firemné príručky, vedecké práce a vlastné poznatky, všetky uvedené v časti ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV.

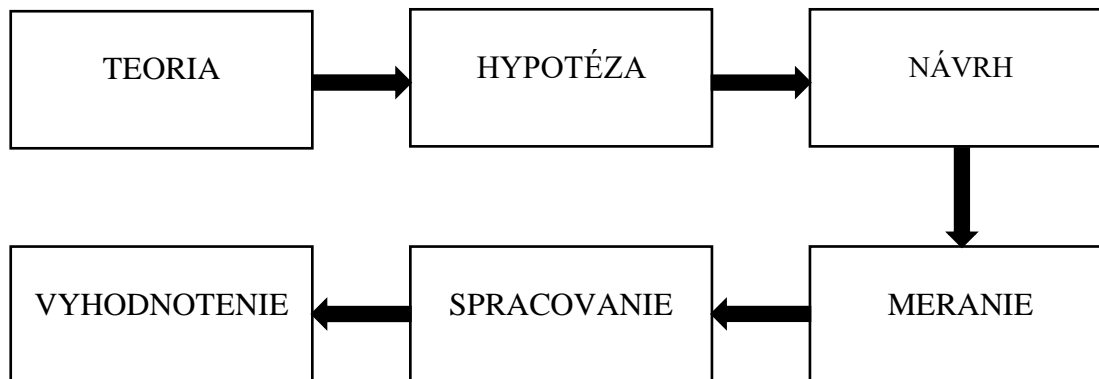
3.3 CIEĽ PRÁCE

Z nadobudnutých poznatkov a s ohľadom na tému vypísanej BP sa bude práca v praktickej časti sústrediť na skúmanie neistôt merania vybraného prietokomeru. S prihliadnutím na potrebu a technické vybavenie ústavu, Odboru fluidného inžinierstva (OFI) Viktora Kaplana sa podrobí experimentálnemu skúmaniu ultrazvukový prietokomer opísaný v §2.2.3. Konkrétny popis meradla sa dostane v nasledujúcej kapitole. Ciele sú nasledovné:

- Navrhnuť experiment
- Realizovať experiment
- Určiť zdroje neistoty a ich vplyv
- Stanoviť možnosti použitia prietokomeru

4 MATERIÁL A POSTUP

Táto kapitola sa venuje popisu experimentu, ktorý vedie k určeniu najvýznamnejších zdrojov neistoty merania a stanoveniu ich vplyvu. Práca postupuje podľa priloženého diagramu.



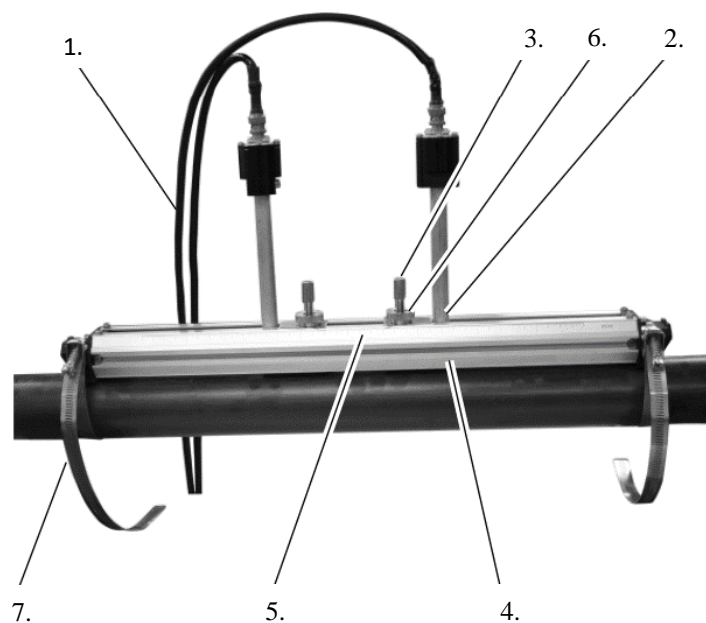
Obrázok 10: *Postupový diagram BP.*

4.1 ULTRAZVUKOVÝ PRIETOKOMER

Práca sa ďalej bude venovať skúmaniu UZ prietokomeru založenom na metóde časovej diferencie. OFI poskytol k realizácii pokusu upevňovací UZ prietokomer od spoločnosti FUJI ELECTRIC. Ide o prietokomer so snímačmi (angl. *Detectors*) typu FSSH (pozri obr. 11) a vysielateľom (angl. *Transmitter*) FSV (pozri obr. 12).

Vybratý snímač prietokomeru je určený do extrémnych podmienok. Ako uvádza výrobca, teplota procesnej látky musí spadať do intervalu -40 až 200 °C. Práve horná hranica je nadštandardne vysoká. Prietokomer je použiteľný pre menovitý priemer potrubia 50 až 400 mm [6]. Použiteľné konštelácie detektorov sú do Z a do V, pričom sa pre väčšinu meraní odporúča meranie so snímačmi na jednej strane, to jest do V. Konštelácia snímačov závisí okrem priemeru potrubia aj od jeho materiálu. Materiály potrubia môžu byť oceľové, kovové, plastové a kompozitné (s vložkou). Zostavené meradlo je na obrázku 10 s vyneseními pozíciami jednotlivých komponentov. Zoznam komponentov s príslušnými pozíciami a stručným popisom ukazuje tabuľka 3.

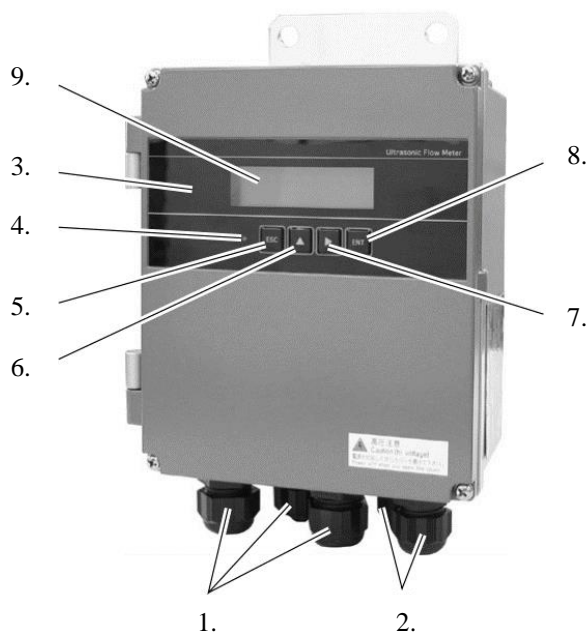
Druhou spomínanou súčasťou prietokomeru je vysielateľ. V jeho tele sa nachádza základná doska s procesorom a ďalšou potrebnou elektronikou. Vysielač komunikuje so snímačmi pomocou signálového kábla FLY. Cez obslužný panel sa priamo zadávajú parametre merania (vstupy) a umožňuje sledovať meranú veličinu (výstup). Signál z vysielateľa je možné elektrickým obvodom previesť do počítača a z neho stanoviť meranú veličinu. Ak si meranie vyžaduje zaznamenávať množstvo dát je vhodné ich mať v digitálnej podobe. Pre potreby výskumného charakteru práce je lepšia druhá zo spomínaných možností. Tá umožňuje a bude aj použitá, snímať prietok po piatich milisekundách. Prietok je meraný v litroch za sekundu.



Obrázok 11: Zostava *detektora FSSH UZ prietokomera* [6].

Tabuľka 3: *Kusovník detektora FSSH UZ prietokomeru* [6].

Poradové číslo	Názov	Popis
1.	Signálový kábel	Vysiela a prijíma signál z vysielача
2.	Vysokoteplotný menič	Vysiela a prijíma UZ vlny
3.	Držiak senzoru	Spája senzor s rámom
4.	Rám	Drží držiak senzoru na trubke
5.	Stupnica	Na meranie vzdialenosti medzi senzormi
6.	Upevňovacia skrutka	Zaist'uje senzor zvolenej pozícií
7.	Uchytávací pás	Oceľový pás uchytáva prietokomer na potrubie



Obrázok 10: Zostava vysielača FSV UZ prietokomera [5].

Tabuľka 4: Kusovník detektora FSSH UZ prietokomeru [5].

Poradové č.	Názov	Popis
1.	Vstupy pre káble	Vstupy pre napájací a výstupný kábel
2.	Vstupy pre káble	Vstupy pre signálové káble
3.	Obslužný panel	Slúži k priamej komunikácii s prietokomerom
4.	LED	Ak meniče zachytávajú UZ vlnu svieti zelená, inak červená
5.	Výstupné tlačidlo	Slúžia k pohybu v protokole prietokomera
6.	Tlačidlo hore	
7.	Tlačidlo do strany	
8.	Vstupné tlačidlo	
9.	LCD Displej	Zobrazuje prietok a nastavenia

4.2 MERACIA TRAŤ

Meracou traťou sa myslí všetko materiálne zabezpečenie potrebné k realizácii experimentu. Vybraný prietokomer je určený k meraniu kvapaliny, ktorá nespôsobuje útlm UZ vln. Experiment je realizovaný so sladkou vodou bližšie nešpecifikovanými vlastnosťami.

4.2.1 NÁVRH MERACEJ TRATE

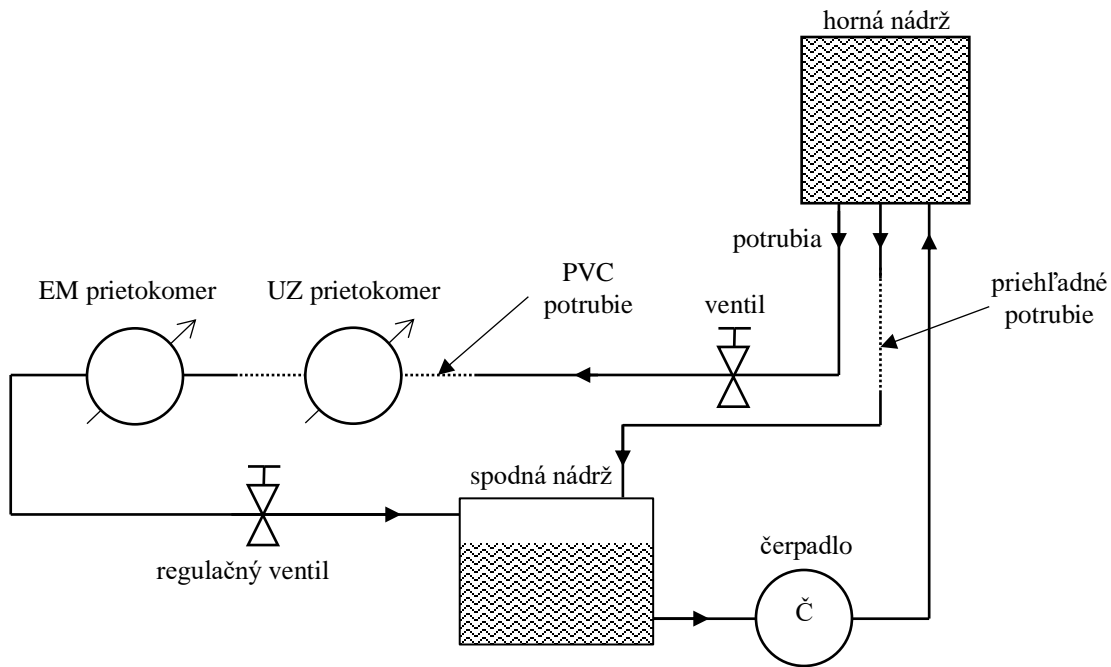
Z preštudovaných materiálov od výrobcu boli uvažované dva varianty meracej trate. Zásadný rozdiel bol v polohe meradla, nakoľko vybraný prietokomer umožňuje merať vo vertikálnej aj

vodorovnej polohe. Ďalej bol navrhnutý materiál potrubia, na ktorom bude upevnený UZ prietokomer. Navrhlo sa meranie na oceľovom a polyvinylchloridovom (PVC) potrubí. Taktiež boli zavedené požiadavky na skutočnú meraciu trať:

- stacionárne prúdenie
- plne zaplnené potrubie s ukludneným rýchlostným profilom
- konštantná teplota média

4.2.2 ZOSTAVENIE MERACEJ TRATE

Prihliadnuc k vybaveniu laboratória OFI a návrhu meracej trate bol vybratý variant s vodorovným potrubím. Jedná sa o PVC potrubie s vonkajší priemer $D = 110$ mm a hrúbkou steny $t = 5,3$ mm. Teplota vody sa v priebehu pokusu ohriala o $\Delta T = 2,3^\circ\text{C}$ z pôvodných $23,5^\circ\text{C}$ na $25,8^\circ\text{C}$. V mieste čerpadla sa kvapalina ohrieva a na otvorenej hladine hornej nádrže sa zasa ochladzuje od okolitého vzduchu. Teplota bola zmeraná bezdotykovým teplomerom v dolnej nádrži (obr. 13). Možno konštatovať, že jedna z požiadaviek na meraciu trať nebola splnená. Predpoklad konštantnej teploty má svoje opodstatnenie. Naplnenie predpokladu stacionárneho prúdenia nastane v čase, keď sa prúdenie ustáli. K plne zaplnenému potrubiu a ukludnenému rýchlostnému profilu dôjde po splnení požiadavok na meraciu trať stanovených výrobcom. Kinematická viskozita vody sa uvažuje konštantná $\mu/\rho = 1,00\text{E}-6$ m²/s.



Obrázok 13: Schéma meracej trate.

Podľa obrázku 13, čerpadlo z dolnej nádrže prečerpáva vodu do hornej nádrže. Vo chvíli keď je horná nádrž plná, začne kvapalina prepadať cez hranu a dvojicou vodozvodných potrubí vracat' do spodnej nádrže. Jedna z vetví ide priamo do spodnej nádrže, na ktorej sa nachádza priehľadné potrubie, ktoré dáva vizuálnu kontrolu zaplnenia potrubia. Prietok sa reguluje ventilom za prietokomermi a otáčkami čerpadla. Na trati sú v sérii zapojené dva prietokomery. Prvý je skúmané meradlo a druhý je prietokomer určený ku kontrole. V pôvodnom návrhu meracej trate bola ku stanoveniu ustáleného stavu prietoku použitá metóda váženia so synchronným užitím hodín. Všeobecne sa považuje za najpresnejšiu metódu [8], ale s ohľadom na časovú náročnosť takéhoto prevedenia bol zvolený práve elektromagnetický prietokomer (§2.2.2).

4.3 VSTUPNÉ PARAMETRE PRIETOKOMERU

V protokole vysieláča je možné nastaviť celú radu vstupných veličín. Zo zadaných vstupov procesor prietokomeru určí rozstup medzi snímačmi. Rozstup sa manuálne nastaví podľa priloženej stupnici. Displej ukazuje rozstup v stotínach milimetra a stupnica má najmenší dielik rovný jednému milimetru. Preto je na mieste uvažovať za prvý zdroj nepresnosti manuálne nastavovania. Vstupné parametre, ktoré možno nastavovať na vysieláči a sú pre experiment zaujímavé sa nachádzajú v nasledujúcom protokole [5]:

- MEASURE SETUP — Nastavenie merania
 - PROCESS SETTING — Procesné nastavenia
 - OUTER DIAMETER — Vonkajší priemer potrubia D [mm]
 - PIPE MATERIAL — Materiál potrubia, zadávaný rýchlosťou šírenia zvuku c_{PVC} [m^2/s]
 - WALL THICKNESS — Hrúbka steny potrubia t [mm]
 - ...
 - KIND OF FLUID — Druh tekutiny, zadávaný rýchlosťou šírenia zvuku c_{H_2O} [m^2/s]
 - ...

4.3.1 CHYBA VSTUPNÝCH PARAMETROV

Vonkajší priemer potrubia je tabuľková hodnota zodpovedajúca $D = 110$ mm. Výrobca garantuje výrobu podľa normy DIN 8062⁶, ktorá definuje toleranciu strednej hodnoty vonkajšieho priemeru rovnú $\pm 0,4$ mm. Do experimentu sa navrhuje priemer zaťažený absolútnou chybou $\pm 0,5$ mm a ± 1 mm. Do vysieláča sa budú postupne zadávať nasledujúce číselné hodnoty: 109; 109,5; 110,5 a 111 mm.

⁶ *Unplasticized polyvinyl chloride (PVC-U) pipes – Dimensions, 2009*

Hrúbka steny potrubia je $t = 5,3$ mm. Hrúbka steny má podľa spomínanej normy prípustnú kladnú chybu $+0,8$ mm. Pre tento vstupný parameter sa určí rovnaká absolútna chyba ako v prípade vonkajšieho priemeru. Pre hrúbku steny absolútna chyba $0,5$ mm predstavuje skoro 10% a chyba 1 mm až 18,9%, číselne vyjadrené: 4,3; 4,8; 5,8 a 6,3 mm. V prevádzkových podmienkach by tak veľká chyba nebola prípustná.

Rýchlosť šírenia zvuku v PVC potrubí je podľa výrobcu $c_{PVC} = 2\,307$ m/s [5]. Za nominálnu hodnotu rýchlosti šírenia UZ vlny v PVC sa chybne stanovila $c_{PVC} = 2\,400$ m/s. Vzhľadom na odlišnosť týchto hodnôt sa môže prejavovať významnosť chyby. Pri meraní boli stanovené relatívne chyby 10% a 5%. Tieto chyby zodpovedajú: 2 160; 2 280; 2 520 a 2 640 m/s a teda hodnota uvádzaná výrobcom sa v rozsahu chyby.

Zvuk sa vo vode šíri podľa tabuľky 1 rýchlosťou $c_{H_2O} = 1\,482$ m/s. Rýchlosť zvuku v kvapaline je významne závislá od jej teploty. Meranie teploty je do veľkej miery dobre zvládnutá úloha, ale nie vždy je možné stanoviť teplotu v mieste prietokomera. Rýchlosť šírenia zvuku vo vode by s relatívnou chybou 1% by predstavovalo ohriatie o 5°C . Chyba šírenia zvuku v procesnej kvapaline je reprezentovaná hodnotami: 1 467; 1475; 1489 a 1497 m/s.

4.4 HARMONOGRAM MERANIA

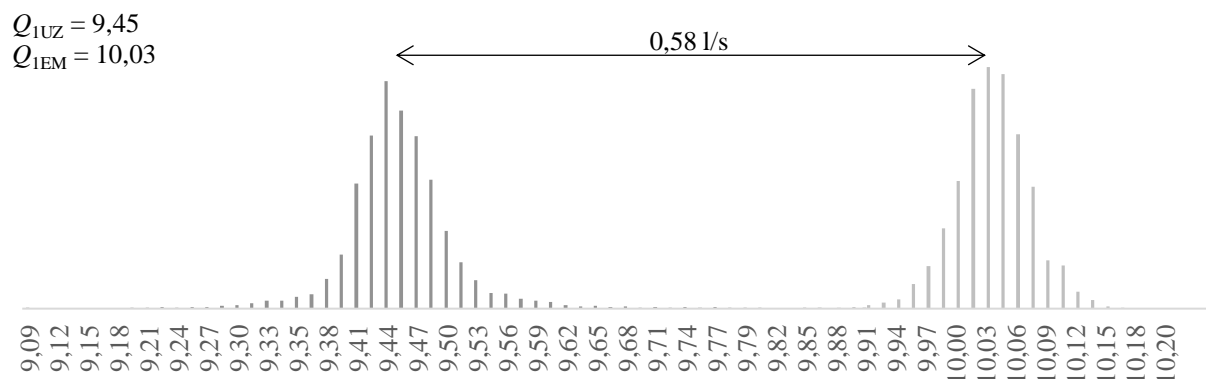
Meranie sa realizuje pri troch vybraných prietokoch Q_1 , Q_2 a Q_3 . Po ustálení prietoku sa zmeria nominálny prietok Q . Následne sa zavádza chyba na vstupných parametroch. Postupne sa menia hodnoty D , t , c_{PVC} a c_{H_2O} . Celkovo tento cyklus obsahuje sedemnásť meraní. Cyklus sa opakuje pre všetky tri vybrané prietoky. Každé meranie prebieha 30 sekúnd, počas ktorých UZ prietokomer zaznamená 6 000 hodnôt prietoku. Súčasťou meracej trate je aj EM prietokomer, ktorý zbiera dáta s rovnakou frekvenciou ako skúmaný prietokomer.

5 VÝSLEDKY A DISKUSIA

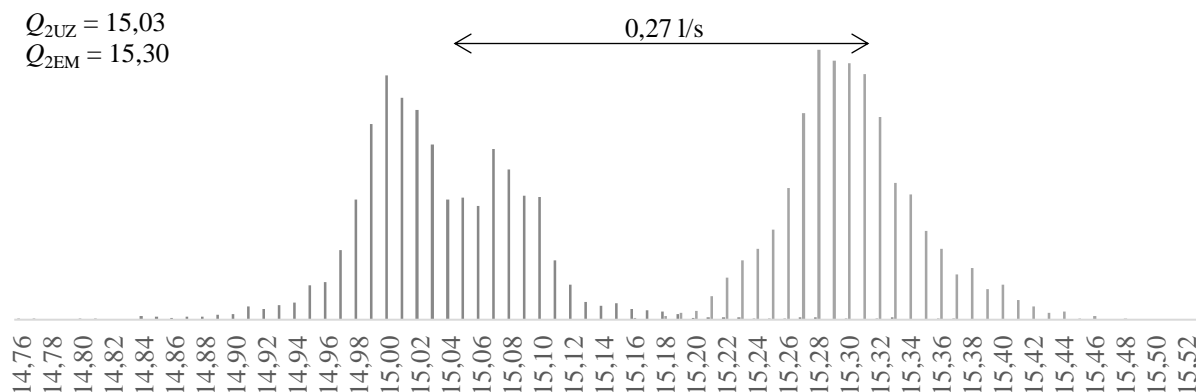
Hodnoty z rozsiahleho merania ako bolo popísané v §4.4 sa následne spracovali za súčinnosti softvéru MICROSOFT EXCEL.

5.1 HISTOGRAM

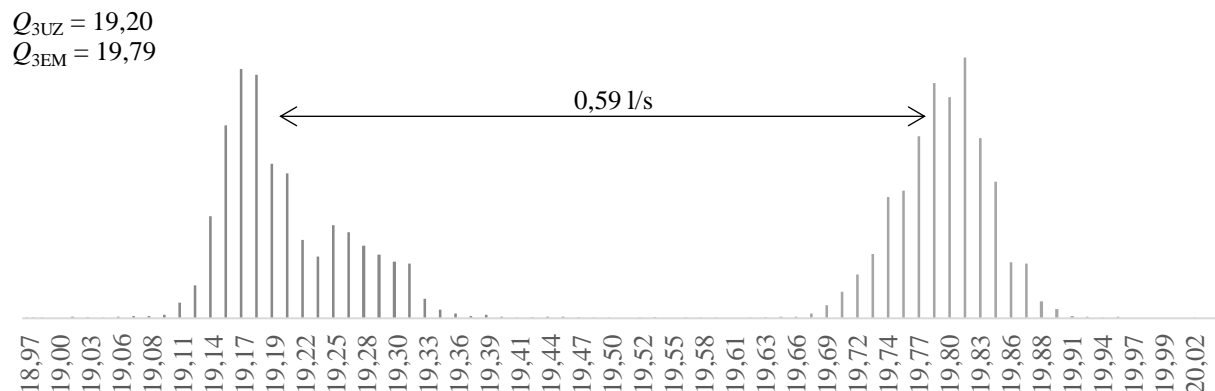
Hodnoty merania sú vo všeobecnosti považované za náhodné veličiny. Rozdelenie náhodných veličín merania nominálneho prietoku zodpovedá normálnemu rozdeleniu popísanému *Gaussovou krivkou* (obr. 14, 15, 16). V ľavej časti týchto histogramov sa nachádza rozdelenie nameraných hodnôt z UZ prietokomera. Na pravo je vidieť rozloženie hodnôt z EM prietokomera. Z grafov je možné pozorovať určité systematické podhodnocovanie skutočného prietoku za platnosti tvrdenia o presnosti EM prietokomera. Súčasťou grafov sú stredné prietoky a vyznačený rozdiel stredných hodnôt.



Obrázok 14: Histogram prietoku Q_1 .



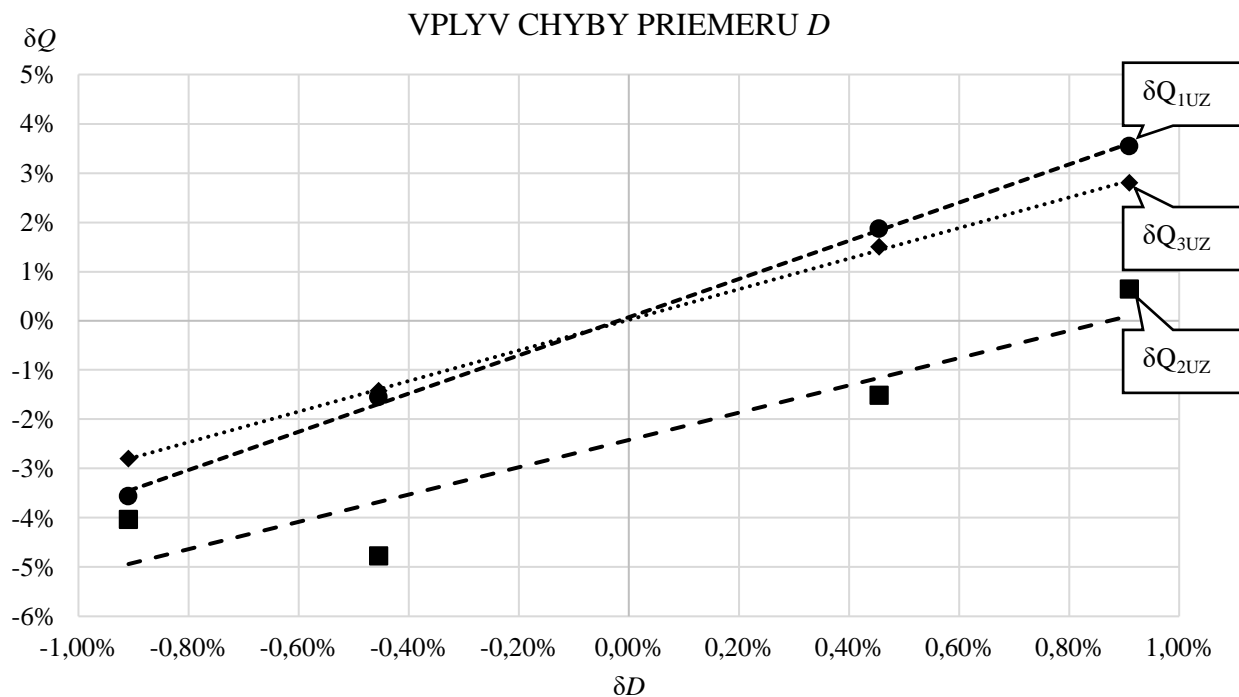
Obrázok 15: Histogram prietoku Q_2 .



Obrázok 16: Histogram prietoku Q_3 .

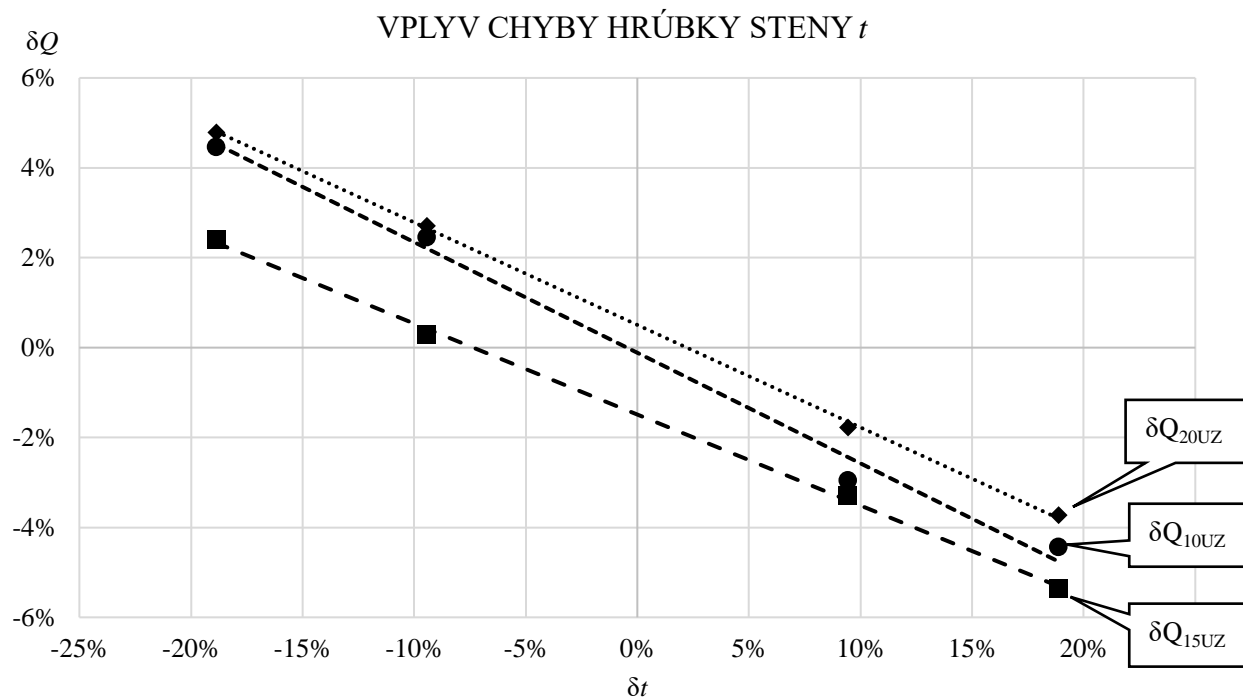
5.2 LINEÁRNE TRENDY

Na grafe (obr. 17) závislosti relatívnej chyby nameraného prietoku a vonkajšieho priemeru potrubia možno badať značnú mieru lineárnej závislosti v tvare $\delta Q = \tan(\alpha) \cdot \delta D$. Pre δQ_{1UZ} uhol α približne predstavuje $75,54^\circ$ a pre δQ_{3UZ} je $72,15^\circ$. Oba prietoky pretínajú počiatok, čo zodpovedá očakávaniam. Lineárna krivka δQ_{15UZ} by mala taktiež prechádzať počiatkom a stúpať pod uhlom medzi $75,54^\circ$ a $72,15^\circ$. Takto má relatívna chyba vybraného prietoku Q_{2UZ} presnejšie nepopísaný vývoj.



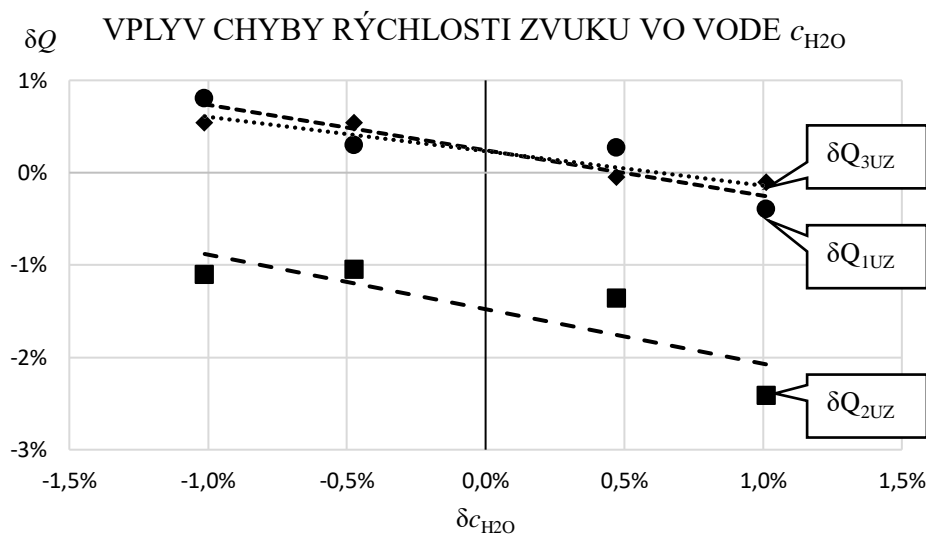
Obrázok 17: Graf $\delta Q = f(\delta D)$

Chyba druhého z dĺžkových parametrov, hrúbka steny, zodpovedá lineárnym trendom na obrázku 18. Priamka chyby hrúbky steny Q_{1UZ} približne prechádza počiatkom. Pre zvyšné dve krivky sa spĺňa hypotéza o lineárnej závislosti, ale bez presnejšieho popisu. Z grafu taktiež plynie podstatne menší vplyv chyby hrúbky steny na celkovú chybu merania. Pri prietoku Q_{1UZ} možno vďaka regresnej analýze konštatovať závislosť $\delta Q_{1UZ} = 0,2461 \cdot |\delta t|$ zodpovedajúcemu uhlu stúpania/klesania 14° , čo je podstatne menej ako v prípade vonkajšieho priemeru. Dôležité je spomenúť, že procesor pri jednotlivých hrúbkach steny stanovoval rozstup senzorov pod úrovňou mierky stupnice.



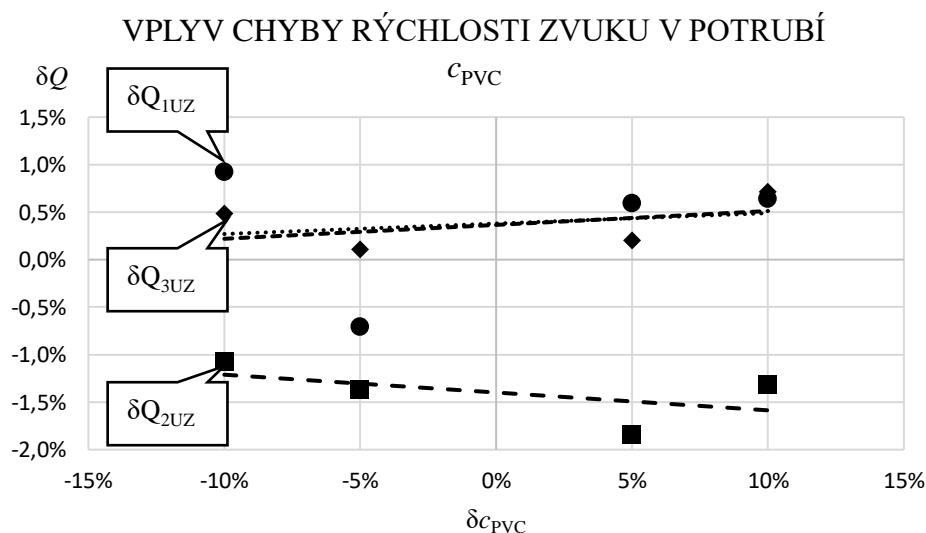
Obrázok 18: Graf $\delta Q = f(\delta t)$.

Opäť sa opakuje skutočnosť popísaná pri hodnotení vplyvu chyby vonkajšieho priemeru. Prvá a tretia krivka sa na obrázku 19 stretli v počiatku, mierne posunuté. Smer druhej krivky je rovnobežný s krivkou 1 a 3, s výrazným posunom.



Obrázok 19: Graf $\delta Q = f(\delta c_{H_2O})$.

V nasledujúcom grafe (obr. 20) vybraný prietok Q_{2UZ} vykazoval atypické správanie. Smernica priamky zachytávajúca trend vplyvu chyby vstupu na výstup má opačné znamienko. Také správanie je ťažko racionálne odôvodniť. Preto pre ďalšie vyhodnocovanie nebude braný do úvahy vplyv tohto prietoku. Z grafu je možné vyčítať zanedbateľný vplyv chyby šírenia zvuku v potrubí.



Obrázok 20: Graf $\delta Q = f(\delta c_{PVC})$.

5.3 NEISTOTA MERANIA

Na posudzovanie presnosti merania sa používajú tri typy neistôt, označované ako typ A, B a C.

5.3.1 ŠTANDARDNÁ NEISTOTA MERANIA u_A

Štandardná neistota typu A pochádza z náhodných chýb. Stanovuje sa zo štatistického nazerania na problém. Pre jej stanovenie je potrebné aspoň desaťkrát opakovať meranie [12]. Štandardná neistota má rovnaký predpis ako štandardná odchýlka priemeru. V softvéri sa použila vstavaná funkcia `=stdev.p()`. Do argumentu funkcie sa dosadzuje 6 000 hodnôt jedného merania. Funkcia počíta podľa vzťahu (10), kde n je počet náhodných veličín x a \bar{x} s čiarou je aritmetický priemer hodnôt.

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}} \quad (10)$$

Nominálne prietoky UZ prietokomeru boli určené s nasledujúcimi neistotami typu A:

$$u_{A1} = \pm 0,064 \text{ l/s}$$

$$u_{A3} = \pm 0,059 \text{ l/s}$$

Prietoky zmerané EM prietokomerom vykazovali približne polovičnú štandardnú odchýlku, teda neistotu typu A. Tento fenomén možno pozorovať aj na distribučných krivkách (pozri obr. 14, 16), na ktorej sú hodnoty EM prietokomera hustejšie rozložené v okolí aritmetického priemeru.

5.3.2 ŠTANDARDNÁ NEISTOTA MERANIA u_B

Neistota typu B pochádza zo systematickej chyby. Na systematickej chybe sa zväčša podieľa mnoho faktorov, o ktorých významnosti sa dá diskutovať. Neistotu typu B je náchylné určovať so značnou mierou subjektivity [12]. Dáta k stanoveniu spomínanej neistoty možno čerpať z dlho trvajúcich meraní. Takáto práca je značne časovo a finančne náročná. Inými relevantnejšími zdrojmi sú dáta poskytované výrobcom meradla, údajmi z kalibrácie alebo kvalifikovaný odhad [13].

Do neistoty typu B sa zahrnie **chyba UZ prietokomera stanovená výrobcom** podľa tabuľky 5. a vplyv **neistoty vonkajšieho priemeru potrubia** (§5.2) na celkové meranie.

Tabuľka 5: *Presnosť prietokomeru podľa parametrov D a v , upravené [6].*

Vonkajší priemer D [mm]	Rýchlosť média v [m/s]	Chyba (Presnosť)
50 až 300	0 až 2	$\pm 0,02 \text{ m/s}$
	2 až 32	$\pm 1,0\% \text{ z merania}$
300 až 400	0 až 0,75	$\pm 1,0\% \text{ z merania}$
	0,75 až 32	$\pm 0,0075 \text{ m/s}$

Podľa tabuľky 5 sa uvažovaný prietok Q_{1UZ} prepočítaný na rýchlosť média nachádza v rozmedzí s predpísanou absolútnou chybou $\pm 0,02$ m/s. Prietok Q_{3UZ} spadá do predpisu s relatívnou chybou $\pm 1,0\%$ z merania. Odchýlka neistoty $\Delta z_{1 \max}$ sa musí prepočítať tak, aby jej jednotky boli totožné s výstupom, t.j. litre za sekundu. Rýchlosť prúdenia sa na prietok prepočíta za pomoci rovnice kontinuity (1). Prietoková plocha je daná vonkajším priemerom a hrúbkou steny potrubia. Kruhovú prietokovú plochu potrubia z experimentu $S \cong 7,76E-6$ m. Po prepočte je $\Delta z_{1 \max} \cong 0,155$ l/s a $\Delta z_{3 \max} \cong 0,192$ l/s. Keďže sa jedná o chybu meradla očakáva sa rovnomerné rozdelenie pravdepodobnosti, odpovedajúce súčiniteľu $k = \sqrt{3}$ [12].

$$u_{Bj} = \pm \frac{\Delta z_{j \max}}{k} \quad [12](11)$$

Neistota typu B prameniaca z chyby vonkajšieho priemeru D sa musí stanoviť s náležitým koeficientom citlivosti ξ_j [12]. Ten je vyjadrený ako podiel absolútnej chyby výstupu a vstupu. Pre prietok Q_1 je stanovený $\xi_2 \cong 0,32$ l/(s·mm) a pre Q_3 je $\xi_2 \cong 0,55$ l/(s·mm). Okrem významnosti vplyvu koeficient zabezpečuje aj zhodnosť jednotiek po prenásobení s u_{B2} [1]. Neuskutočneným meraním náhodných veličín vonkajšieho priemeru sa predpokladá normálne rozdelenie. Normálnemu rozdeleniu zodpovedá súčiniteľ $k = 1$ pre veľkosť tolerance $\Delta z_{2 \max} = 0,4$ mm. Výpočet by sa značne skomplikoval ak by sa do úvahy vzali aj iné vstupné parametre, navzájom závislé [13]. Bolo by potrebné získať korelačné koeficienty medzi jednotlivými vstupmi. V §5.2 bolo uvedené, že hrúbka steny nemá zásadnejší vplyv na výslednú chybu merania. Rýchlosti šírenia zvuku vo vode a v potrubí sú naďalej určené bez znalosti ich neistoty, preto sa nebudú zahŕňať do výpočtu. Problematické by bolo aj použiť pre výpočet neistoty typu B vzťah zodpovedajúci nepriamemu meraniu [12]. Bolo očividne preukázané, že objemový prietok je nepriamo získaná hodnota. Napriek tomu sa ďalej bude postupovať s týmto zjednodušením.

Neistota typu B sa potom vypočíta ako:

$$u_B = \sqrt{\sum \xi_j^2 \cdot u_{Bj}^2} \quad [12] \text{ upravené (12)}$$

Poznámka: Koeficient citlivosti $\xi_1 = 1$, lebo má priamy vplyv na výsledok merania [12].

$$u_{B1} \cong \pm 0,156 \text{ l/s}$$

$$u_{B3} \cong \pm 0,246 \text{ l/s}$$

5.3.3 NEISTOTA MERANIA u_C

K stanoveniu kombinovanej neistoty merania typu C sú potrebné u_A a u_B , ich geometrický súčet.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad [12](13)$$

$$Q_1 = 9,45 \pm 0,1687 \text{ \& } Q_3 = 19,02 \pm 0,253$$

6 ZÁVER

Zo štyroch skúmaných vstupných parametrov (vonkajší priemer potrubia, hrúbka steny potrubia, rýchlosť šírenia zvuku vo vode, rýchlosť šírenia zvuku v potrubí) UZ upevňovacieho prietokomera, má **najzásadnejší vplyv** na chybu meraného prietoku práve miera presnosti **vonkajšieho priemeru potrubia**. Toto zistenie podporuje informácia uvádzaná výrobcom skúmaného prietokomera, a teda 1% chyba vonkajšieho priemeru spôsobí 3% chybu na výstupe [5]. Uvedená informácia bola potvrdená grafom z merania (pozri obr. 17). Treba dodať, že s narastajúcim prietokom daná významnosť narastá. Pre elimináciu chyby merania tohto druhu, práca odporúča pred zahájením samotného merania desaťkrát zmerať posuvným meradlom vonkajší priemer potrubia a z neho vyhodnotiť hodnotu pre vstup prietokomera. **Druhým** čo do významnosti vplyvu presnosti vstupných parametrov je významnejšia **rýchlosť šírenia zvuku vo vode**, ktorej zodpovedá 1:1 relatívna chyba vstup—výstup. Chyba hrúbky steny spolu s rýchlosťou šírenia zvuku v potrubí má zanedbateľný vplyv na chybu merania.

Pre dva z troch nominálnych prietokov bola stanovená kombinovaná neistota typu C. Neistota typu A je podstatne menšia ako typu B. Neistota B bola stanovená s ohľadom na presnosť merania prietokomera udávanú výrobcom a vonkajšieho priemeru potrubia. Presnosť udávaná výrobcom vychádza z priamo meranej rýchlosti prúdenia. Účelom práce bolo popísať možnosti merania prietoku a stanovenie neistoty daného prietokomera. Zovšeobecnením poznatkov prameniacych z popísaného experimentu a nadobudnutých vedomostí, prietokomer meria s neistotou $\pm 0,1687$ l/s pri meraní do medzného prietoku 15,52 l/s. Ak je dopredu vykonané meranie priemeru potrubia vedúcemu k stanoveniu jeho strednej hodnoty s neistotou, má neistota merania tendenciu sa zmenšiť.

Z experimentu vyplynula potreba pred ďalším použitím daného prietokomera podrobiť ho kalibrácii. Sériovo zapojený EM prietokomer slúžiaci ako kalibračné meradlo, ukázal značnú odchýlku UZ prietokomera od vlastnej strednej hodnoty. Kalibráciou by sa zabránilo šíreniu systematickej chyby. EM prietokomer meral s polovičnou neistotou typu A, preto sa dá považovať za presnejšie meradlo.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] BELL, S. 2001-03. *Measurement Good Practice Guide No. 11: A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement* (online). 2. vydanie. Teddington: National Physical Laboratory. ISSN 1368-6550
URL: https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg11_uncertainty.pdf
- [2] DRAHM, W., POPP, O., TOUZIN, M. 2013 *Future Challenges of Flow Measurement: towards smart and compact sensors* (online). Norinberg: ANA Conferences 2013. ISBN 978-9813484-3-9
URL: <https://www.ama-science.org/proceedings/details/1553>
- [3] ĎAĎO, V., BEJČEK, L., PLATIL, A. 2005. *Měření průtoku a výšky hladiny*. 1. vydanie. Praha: BEN. 448 strán. ISBN 80-7300-156-X
- [4] ENDRESS+HAUSER. *Flow measuring technology for liquids, gases and steam: Products and services at a glance* (online).
URL: https://portal.endress.com/wa001/dla/5001109/7297/000/04/FA00005DEN_1918.pdf
- [5] FUJI ELECTRIC. 2016-06. *Instruction Manual: Time Delta-C Ultrasonic Flowmeter Flow Transmitter*. 5. vydanie. Tokio.
- [6] FUJI ELECTRIC. 2016-06. *Instruction Manual: Ultrasonic Flowmeter Detector*. 5. vydanie. Tokio.
- [7] GRAND VIEW RESEARCH. 2010-03. *Flow Meter Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product, By Application (Water & Wastewater, Oil & Gas, Chemical, Power Generation, Pulp & Paper, Food & Beverage), By Region, And Segment Forecasts, 2021 - 2028* (online). Report ID: GVR-2-68038-150-4
URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/flow-meters-market>
- [8] CHUDÝ, V., et al. 1999. *Meranie technických veličín*. 1. vydanie. Bratislava: Vydavateľstvo STU. 688 strán. ISBN 80-227-1275-2
- [9] KADLEC, K., et al. 2015. *Technologie potravin: Měření a řízení v potravinářských a biotechnologických výrobcích*. 1. vydanie. Ostrava: KEY Publishing. 820 strán. ISBN 978-80-7418-232-7
- [10] OMEGA. 2018-08-31. *Lessons about Positive Displacement Flow Meters*. (online)
URL: <https://www.omega.com/en-us/resources/positive-displacement-flow-meter>

- [11] QUANTRUM HYDROMETRIE. 2001-07. *Bau und Betrieb von Ultraschall-Durchflussmessanlage* (online).
URL: https://www.quantum-hydrometrie.de/quantum/Allgemeiner_Leitfaden_Us.pdf
- [12] TŮMOVÁ, O., PANC, T. 2013 *Možnosti vyjádření přesnosti měření II: použití v praxi* (online). Automa 12, s. 48-52
URL: <https://automa.cz/page-flip/casopis/automa/2013/12/index.html#page/50>
- [13] URBÁNEK, Z. 2009. *Přesnost nepřímých měření*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [14] Vyhláška č. 161/2019 Z. z. Úřadu pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo Slovenskej republiky.

WEBSTRÁNKY SPOMÍNANÝCH SPOLOČNOSTÍ

EMERSON

<https://www.emerson.com/en-us/catalog/automation-solutions/measurement-instrumentation/differential-pressure-flow/rosemount-sku-3051sfc-wireless-conditioning-orifice-flowmeter>

ENDRESS+HAUSER

<https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/flow-measurement-product-overview>

FLWSOLV®

https://www.flwsolv.com/?gclid=EAIaIQobChMIiq223rfb8AIVQ_1yCh0_YQJzEAAYASAAEgIRdfD_BwE

KRONE

<https://krohne.com/en/products/flow-measurement/flowmeters/variable-area-flowmeters/>

SIERRA

<https://www.sierrainstruments.com/library/videos/thermal-dispersion-mass-flow-meter-technology?auto=true>

TELEDYNE TECHNOLOGIES

<http://www.teledynemarine.com/rdi/#>